

Schubtragverhalten
von
Spannbetonbalken

B e r i c h t

vorgelegt von

o.Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dr.-Ing. M. Teutsch

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, April 1986

Gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissen-
schaft und Kunst aus Forschungsmitteln des Zahlenlottos

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
1.1	Problemstellung	2
1.2	Derzeitiger Forschungsstand	3
1.3	Ziel und Umfang der eigenen Untersuchungen	5
2	VERSUCHSKÖRPER	6
2.1	Versuchskörperabmessungen und Bewehrungsanordnung	6
2.2	Materialkunde	8
2.2.1	Beton	8
2.2.2	Beton- und Spannstähle	11
2.3	Herstellung und Lagerung der Versuchskörper	12
2.4	Vorspannen	13
3	VERSUCHSEINRICHTUNG	15
3.1	Meßstellenanordnung	15
3.2	Belastungseinrichtung	16
4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	18
4.1	Allgemeines	18
4.2	Versuchsbalken SB 1	20
4.3	Versuchsbalken SB 2	22
4.4	Versuchsbalken SB 3	23
4.5	Versuchsbalken SB 4	25
4.6	Versuchsbalken SB 5	26
4.7	Versuchsbalken SB 6	29
4.8	Versuchsbalken SB 7	30
5	MESSERGEBNISSE	32
5.1	Allgemeines	32
5.2	Balkendurchbiegungen.	33
5.3	Rißentwicklung.	34

5.4	Spannstahl- und Betonstahldehnungen . . . . .	.35
5.5	Betonverformungen . . . . .	.36
6	ANALYSE DES TRAGVERHALTENS . . . . .	.37
6.1	Vergleich mit geltenden Bemessungs- vorschriften . . . . .	.37
6.2	Einflußparameter auf das Schubtrag- verhalten . . . . .	.43
6.3	Überprüfung des Schubbemessungsvor- schlages für Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund an Versuchser- gebnissen . . . . .	.53
6.4	Schubtragverhalten von Betonbalken mit Vorspannung ohne Verbund. . . . .	.57
7	ZUSAMMENFASSUNG. . . . .	.62
8	LITERATUR . . . . .	.63
9	ANLAGEN . . . . .	.67

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Das Schubtragverhalten von Stahlbetonbalken wurde in den letzten Jahren sowohl experimentell als auch theoretisch intensiv untersucht. Zu erwähnen sind hier die experimentellen Untersuchungen von Leonhardt/Walter /1/, Placas/Regan /2/, Krefeld/Thurston /3/ und Braestrup/Nielsen/Bach/Jensen /4/. Aufgrund der großen Anzahl der durchgeführten experimentellen Untersuchungen können beliebige Traglast- bzw. Bemessungsmodelle überprüft und verbessert werden. Eine grundlegende Analyse der Schubversuche an Stahlbetonbalken einschließlich der Darstellung der Abhängigkeit der Traglast von verschiedenen Parametern wurde in jüngster Zeit von Kordina u.a. /5/, Moosecker /6/ und Malleé /7/ durchgeführt.

Eine Erweiterung dieser Analyse auf Spannbetonbalken erfolgte bisher nicht, wahrscheinlich begründet durch die Tatsache, daß auf diesem Gebiet bisher relativ wenige experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden sind. Hier setzt das vorliegende Forschungsvorhaben an: Zunächst wurde an 7 Spannbetonbalken mit nachträglichem Verbund das Schubtragverhalten unter Variation wichtiger Parameter experimentell untersucht. Nach einer gründlichen Analyse ihres Schubtragverhaltens unter Einbeziehung fremder Untersuchungen wurde der Einfluß der Vorspannung auf das Schubtragverhalten dargestellt. Auf der Grundlage dieser Analyse wurden anschließend Bemessungsgrundlagen erarbeitet.

1.2 Derzeitiger Forschungsstand

Trotz der umfangreichen Forschungstätigkeit auf dem Gebiet des Schubtragverhaltens von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen gelang es bisher nur in Ansätzen ein einheitliches Schubbemessungskonzept sowohl für Stahlbeton- als auch Spannbetonbauteile zu entwickeln.

Immerhin sind in der großen Zahl von Veröffentlichungen bestimmte Gemeinsamkeiten zu erkennen: So gehen die meisten Autoren bei der Beschreibung der inneren Kräfteverteilung von der Fachwerkanalogie aus, d.h. der Stahlbeton- bzw. Spannbetonträger wird durch ein Netzfachwerk mit Druckstäben aus Beton und Zugstäben aus Stahl ersetzt.

Die Fachwerkanalogie wurde zu Anfang dieses Jahrhunderts von Ritter /8/ und Mörsch /9/ entwickelt. Nach dieser Vorstellung bildet sich im Zustand II ein Fachwerk mit parallelen Gurten und unter 45° geneigten Druckstreben, sowie je nach Neigungswinkel der Schubbewehrung mit zwischen 45° und 90° geneigten Zugstreben aus. Die durchgeführten Untersuchungen haben jedoch schon bald gezeigt, daß sich häufig eine flachere Neigung der Druckstreben einstellt und die Beanspruchung der Schubbewehrung geringer ist als nach der klassischen Fachwerkanalogie errechnet. Spätere Untersuchungen ergaben, daß diese Unterschiede neben der angegebenen flacheren Neigung der Druckstreben auf eine Querkraftabtragung über Rißverzahnung, Dübelwirkung der Längsbewehrung sowie über einen geneigten Druckgurt zurückzuführen sind.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde es in DIN 1045 /10/ und DIN 4227 /11/ gestattet, die erforderliche Schubbewehrung "nach Mörsch" mit einem Beiwert abzumindern.

Das Schubversagen eines schubbewehrten Biegetragwerkes wird in der Regel durch einzelne oder mehrere Schubrisse angekündigt. Obwohl das eigentliche Schubversagen meist recht unterschiedlich verläuft, lassen sich die auftreten-

den Schubversagensformen 3 Brucharten zuordnen.

1. Biegeschubversagen

Dieses Versagen tritt im wesentlichen bei Balken ohne oder mit nur geringer Schubbewehrung auf. Der zum Versagen führende Schubriß entwickelt sich entweder aus einem Biegeriß oder entsteht unmittelbar im Steg durch Überschreiten der Betonzugfestigkeit. Die vorhandene Schubbewehrung erreicht unmittelbar mit der Schubrißbildung die Streckgrenze. Die Querkraftaufnahme erfolgt in erster Linie durch die geneigte Biegedruckzone und die Dübelwirkung der Längsbewehrung.

2. Schubzugbruch

Bei Balken, die durch einen Schubzugbruch versagen, ist nach der Schubrißbildung noch eine deutliche Laststeigerung möglich, da hier in der Regel eine ausreichende Schubbewehrung vorhanden ist. Die Schubbewehrung sorgt sowohl für die Begrenzung der Rißbreiten als auch für eine gleichmäßige Rißverteilung. Hierdurch wird ein vorzeitiges Einschnüren der Biegedruckzone verhindert und es kann sich die volle Fachwerkwirkung einstellen. Erst wenn bei weiterer Laststeigerung die Streckgrenze der Schubbewehrung erreicht wird, öffnen sich die Schubrisse schneller und dringen bis zur Biegedruckzone vor.

3. Druckstrebenversagen

Der Druckstrebenbruch tritt vorwiegend bei hochschubbewehrten profilierten Querschnitten mit dünnen Stegen auf. Im Steg bilden sich ähnlich wie beim Schubzugbruch zunächst zahlreiche Schubrisse mit einer mittleren Neigung zwischen 35° und 45° . Die Schubbewehrung wird selbst im Bruchzustand nicht bis zur Streckgrenze beansprucht. Der schlagartige Bruch tritt dann auf, wenn die Druckstreben zwischen den Schubrisen ihre

Grenztragfähigkeit erreichen.

Die Untersuchungen an Stahlbeton- und Spannbetonbalken haben gezeigt, daß keine grundsätzlichen Unterschiede im Schubtragverhalten dieser beiden Bauarten bestehen. Vorliegende Untersuchungen an Spannbetonbalken z.B. von Leonhardt/Koch/Rostásy /2/ und Thürlimann et al /13/ zeigen jedoch, daß durch die Vorspannung die Bügelbeanspruchung vermindert wird.

In DIN 4227 Teil 1 /11/ wird dieser Einfluß bei der Schubbemessung nur unbefriedigend berücksichtigt. Demgegenüber sind in der CEB/FIP Mustervorschrift /14/ die o.a. Ergebnisse in die entsprechenden Schubnachweise eingeflossen. Hier ist der sog. Betonabzugswert, der die von einem 45°-Fachwerkmodell abweichenden Querkraftanteile zusammenfaßt, in seiner Höhe direkt vom Vorspanngrad abhängig.

1.3 Ziel und Umfang der eigenen Untersuchungen

In die deutschen Schubbemessungsvorschriften für Spannbetonbalken sind die entsprechenden Konzepte für Stahlbetonbalken weitgehend übertragen worden. Hierbei wurde nicht ausreichend berücksichtigt, daß sich die Einflußparameter der Schubtragfähigkeit wie Querschnittsform, Querschnittsschlankheit, Schubschlankheit sowie Schubbeanspruchungsgrad bei Spannbetonbalken erheblich von den entsprechenden Parametern bei Stahlbetonbalken unterscheiden können. Zum anderen zeigte eine Voruntersuchung, daß die Nichtberücksichtigung der Vorspannkkräfte zu einer unwirtschaftlichen Schubbemessung bei Spannbetonbalken führt, wenn die für Stahlbetonbalken geltenden Modelle einfach übertragen werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, verbesserte Grundlagen für die Schubbemessung von Spannbetonbalken zu erarbeiten. Dazu wurde in einem ersten Schritt experimentelle Untersuchungen an 7 Spannbetonbalken mit nachträgli-

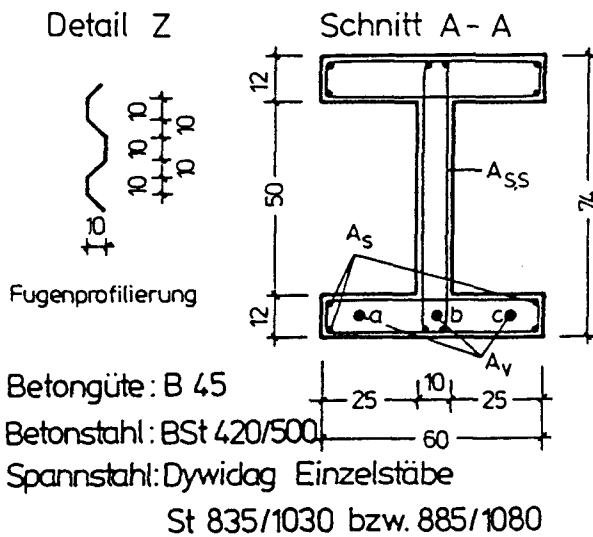
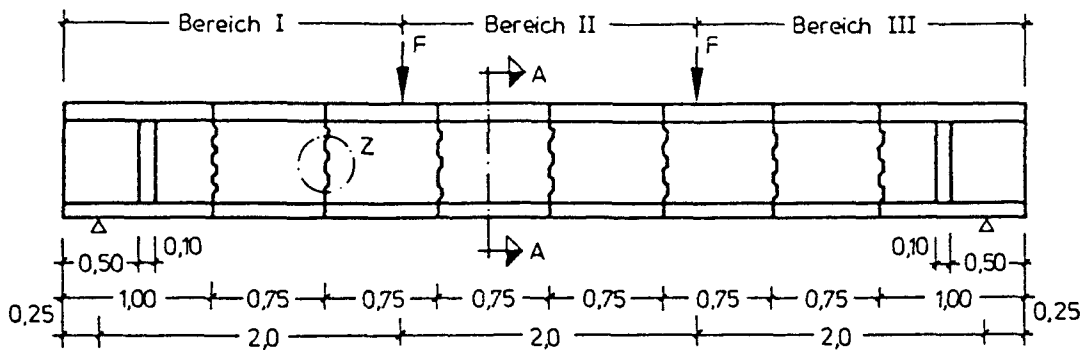
chem Verbund durchgeführt, bei denen u.a. der Vorspann- sowie der Schubbewehrungsgrad als wesentliche Einflußgrößen der Schubtragfähigkeit variiert wurden. Die Versuchskörper wurden im Gebrauchszustand einer Dauerschwellbeanspruchung unterworfen, um deren Einfluß auf das Verbundverhalten der Spannstähle zu untersuchen. Über das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in /15/ berichtet worden. Gleichzeitig war aus dieser Versuchsdurchführung zu ersehen, welchen Einfluß eine Dauerschwellbeanspruchung auf die Größe des bei der Schubbemessung anzusetzenden Betonabzugswertes besitzt.

Neben den eigenen Versuchen wurden alle verfügbaren experimentellen Untersuchungen in eine systematische Analyse des Schubtragverhaltens mit einbezogen. Mit erfaßt wurden auch Untersuchungen an Balken mit Vorspannung ohne Verbund. Auf diesem letztgenannten Gebiet ist noch eine sehr große Wissenslücke vorhanden. Auf der Grundlage der durchgeführten Parameterstudien wurden anschließend Bemessungsvorschläge erarbeitet.

2 Versuchskörper

2.1 Versuchskörperabmessungen und Bewehrungsanordnung

In Bild 2.1 wird eine Übersicht der geprüften Balken gegeben. Hieraus sind Abmessungen, Menge und Verteilung der Betonstahl-Längs- und Bügelbewehrung sowie Lage und Anordnung der stets geradlinig geführten Spannglieder ersichtlich. Es wurden glatte und gerippte Stabspannglieder der Firma Dyckerhoff + Widmann AG eingesetzt.



Versuchsparameter

Versuchs- balken	A_v	A_s	I	II	$A_{s,s}$ III
SB 1 Segmentb.	3 ϕ 26,5 ger.	6 ϕ 6	ϕ 8 e=30	ϕ 6 e=30	ϕ 8 e=20
SB 2 Segmentb.	3 ϕ 26,0 glatt	6 ϕ 6	ϕ 8 e=15	ϕ 6 e=15	ϕ 6 e=10
SB 3 Segmentb.	3 ϕ 32,0 glatt	6 ϕ 6	ϕ 8 e=15	ϕ 6 e=30	ϕ 8 e=20
SB 4 Segmentb.	3 ϕ 32,0 glatt	6 ϕ 6	ϕ 10 e=15	ϕ 6 e=7,5	ϕ 10 e=20
SB 5 monolithisch	3 ϕ 26,0 glatt	4 ϕ 16 2 ϕ 8	ϕ 8 e=15	ϕ 10 e=25	ϕ 8 e=10
SB 6 monolithisch	3 ϕ 15,0 ger.	5 ϕ 16 2 ϕ 8	ϕ 6 e=20	ϕ 6 e=25	ϕ 6 e=15
SB 7 monolithisch	3 ϕ 26,0 2 ϕ 32,0 glatt	2 ϕ 10	ϕ 10 e=30	ϕ 10 e=25	ϕ 10 e=25

Bild 2.1: Übersicht über die Versuchskörper

Die aus Bild 2.1 erkennbaren Verstärkungen im Auflagerbereich dienten zur Verhinderung eines vorzeitigen Bruches in den Krafteinleitungszonen. Alle Versuchskörper besitzen drei unterschiedlich bügelbewehrte Bereiche. Durch diese Maßnahme ist es möglich in der Regel zwei, im Maximalfall 3 Bruch- bzw. Versagenszonen zu erzeugen. Neben der unterschiedlichen Schubbewehrungsbildung ist zur Erzielung dieser mehrfachen Brüche noch eine Lastumgruppierung notwendig. Im Detail wird in Kapitel 3.2 über diese Veränderung der Belastungsaufbringung berichtet.

Von den 7 Versuchsbalken waren 4 als Segment- und 3 als teilweise vorgespannte Balken ausgebildet. Untersuchungen von Teutsch/Weber /16/ zeigen, daß segmentäre Balken mit feinprofilierter Schubverzahnung im Stegbereich annähernd

das gleiche Schubtragverhalten zeigen wie monolithisch ausgebildete Bauteile. Deshalb können diese Untersuchungen auch in die Betrachtungen über das Schubtragverhalten von monolithischen Spannbetonbalken mit einbezogen werden.

Bei den Segmentbalken wurde ein I-Querschnitt zugrundegelegt. Hier wurde neben dem Schubbewehrungsgrad ausschließlich der Durchmesser der Spannstähle und damit der Vorspanngrad variiert. Bei den teilweise vorgespannten Balken wurde ebenfalls ein I-Querschnitt zugrundegelegt. Bei Balken SB 6 fehlte jedoch der Zugflansch im Prüfbereich. Ansonsten wurden bei den teilweise vorgespannten Balken der Schubbewehrungsgrad, der Durchmesser der Spannstähle und damit der Vorspanngrad sowie die Menge der Betonstahllängsbewehrung variiert.

2.2 Materialkennwerte

2.2.1 Beton

Für alle Versuchskörper wurde eine Betonfestigkeitsklasse B 45 angestrebt. Der Wasser-Zement-Wert betrug im Mittel 0,59 bei einem mittleren Zementgehalt von 372 kg/m³. Als Zement wurde ein güteüberwachter Portlandzement PZ 35 F verwandt. Da die Versuchskörper sehr feingliedrig gestaltet waren, wurde zur Vermeidung von Betonfehlstellen ein Betonverflüssiger der Firma Woermann (1,5 % des Zementgewichtes) eingesetzt. Das Größtkorn der Zuschläge betrug 16 mm; das Ausbreitmaß lag bei 35,8 cm ohne und bei 39,4 cm mit Betonverflüssiger. Die genaue Frischbetonzusammensetzung kann Bild 2.2 entnommen werden.

Zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften wurden während des Betonierens der Versuchsbalken zahlreiche Begleitkörper (Würfel, Spaltzugkörper und Prismen) hergestellt, anhand derer die Betongüte (Lagerung nach DIN 1048) sowie die Festigkeitsentwicklung des Betons der Versuchskörper

ermittelt wurden. Die Mittelwerte dieser Untersuchungen sind in Bild 2.3 zusammengefaßt; die an Prismen gewonnene Spannungs-Dehnungs-Linie ist in Bild 2.4 dargestellt und stellt ebenfalls eine gemittelte Kurve dar.

Balken	Betonage	Anteile je m ³ frisch verdichteten Beton in kg						w=W/Z	Ausbreitmaß a in cm	
		Zement	Wasser	0/2	2/8	8/16	Σ		ohne BV	mit BV
SB 1	1	379	213	555	887	407	1 809	0,56	34,5	40,5
	2	376	211	549	880	403	1 833	0,56	34,5	38,5
SB 2	1	365	250	535	856	392	1 784	0,68	35,0	36,5
	2	373	216	546	874	401	1 821	0,58	36,0	39,0
SB 3	1	373	212	549	878	403	1 830	0,57	35,0	39,0
	2	373	212	546	874	401	1 821	0,57	35,5	38,5
SB 4	1	373	216	546	874	400	1 820	0,58	36,5	40,5
	2	369	217	541	866	397	1 804	0,59	36,0	39,0
SB 5		370	221	543	868	398	1 809	0,60	36,0	39,5
SB 6		369	220	540	865	396	1 801	0,60	38,0	41,0
SB 7		373	224	547	875	401	1 825	0,60	36,5	41,0

Bild 2.2: Frischbetoneigenschaften

Versuchs - balken		Würfeldruckfestigkeit			Prismen- festigkeit	E - Modul	Spaltzug- festigkeit	Biegezug- festigkeit
		β_{w7} N/mm ²	β_{w28} N/mm ²	β_w N/mm ²	β_p N/mm ²	E_b N/mm ²	β_{sz} N/mm ²	β_{Bz} N/mm ²
SB 1	1	39	56	54	46	25 750	3,32	4,13
	2	40	—	55	48	25 850	3,76	4,22
SB 2	1	42	56	54	49	24 500	3,27	3,27
	2	36	—	47	40	23 200	3,42	3,14
SB 3	1	42	58	56	50	26 750	3,46	4,09
	2	37	—	54	48	25 950	3,31	3,90
SB 4	1	41	56	59	49	24 850	3,40	4,17
	2	40	—	58	46	24 050	3,41	4,03
SB 5		43	58	53	44	25 533	3,21	3,77
SB 6		35	50	46	46	25 700	3,61	4,16
SB 7		40	52	56	48	27 433	3,86	4,35

Bild 2.3: Festbetoneigenschaften

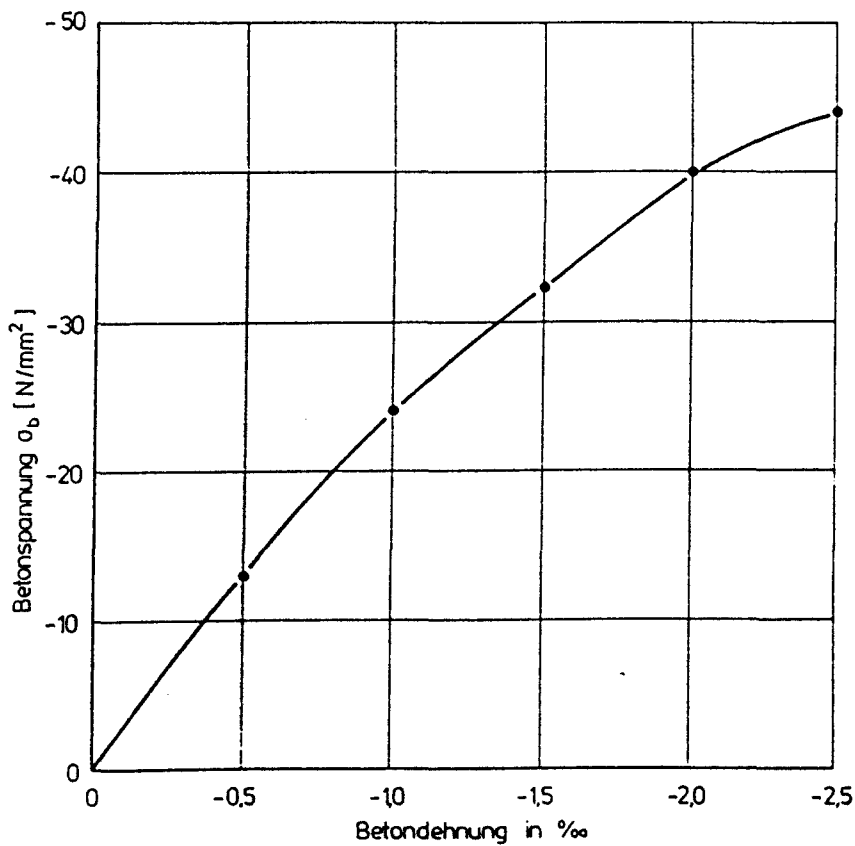


Bild 2.4: Spannungsdehnungskurve des Betons

2.2.2 Beton- und Spannstähle

Für die schlaffe Bügel- und Längsbewehrung der Versuchsbalken wurden Betonstähle der Güte BSt 420/500 RK verwendet. Als Spannstahlbewehrung wurden gerippte Dywidag-Spannstäbe aus St 835/1030 bzw. St 885/1080 mit einem Durchmesser von 15,0 bzw. 26,5 mm und glatte Spannstäbe aus St 835/1030 mit 26,0 mm bzw. 32,0 mm Durchmesser eingesetzt. Die an Materialproben gewonnen Kennwerte der verwendeten Beton- und Spannstähle sind in Bild 2.5 zusammengefaßt.

Versuchs- balken	Stahlkennwerte								
	Betonstahl 420/500				Spannstahl				
	Nenn- durch- messer d_o	Quer- schnitts- fläche A_s	Streck- grenze β_s	Zug- festig- keit β_z	Nenn- durch- messer d_o	Quer- schnitts- fläche A_v	Streck- grenze $\beta_{o,z}$	Zug- festig- keit β_z	E - Modul
	mm	cm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm	cm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
SB 1	6,0	0,286	469,0	573,0	26,5 ger.	5,52	867,0	1 105,0	$2,10 \cdot 10^5$
	8,0	0,496	506,0	709,0					
	10,0	0,752	495,0	637,0					
SB 2	6,0	0,286	469,0	573,0	26,0 glatt	5,49	868,0	1064,0	$2,06 \cdot 10^5$
	8,0	0,496	506,0	709,0					
SB 3	6,0	0,286	469,0	573,0	32,0 glatt	8,20	840,0	1081,0	$2,09 \cdot 10^5$
	8,0	0,496	506,0	709,0					
SB 4	6,0	0,298	475,0	572,0	32,0 glatt	8,15	849,0	1055,0	$2,04 \cdot 10^5$
	10,0	0,802	517,0	656,0					
SB 5	8,0	0,526	430,0	506,0	26,0 glatt	5,46	872,0	1063,0	$2,14 \cdot 10^5$
	10,0	0,802	451,0	513,0					
	16,0	0,000	484,0	701,0					
SB 6	6,0	0,303	466,0	574,0	15,0 ger.	1,72	964,0	1 105,0	$2,14 \cdot 10^5$
	8,0	0,526	430,0	506,0					
	16,0	2,000	484,0	701,0					
SB 7	10,0	0,802	451,0	513,0	26,0 glatt	5,76	872,0	1063,0	$2,14 \cdot 10^5$
					32,0	8,20	840,0	1081,0	$2,09 \cdot 10^5$

Bild 2.5: Kennwerte der bei den Versuchsbalken verwendeten Beton- und Spannstähle

2.3 Herstellung und Lagerung der Versuchskörper

Nachdem die Spannstäbe an den vorgesehenen Stellen mit Dehnmeßstreifen versehen worden waren, wurden sie in die Hüllrohre eingefädelt und in ihrer endgültigen Lage fixiert. Bei den Segmentbalken liefen die Hüllrohre ungestoßen über die Fugen hinweg. Die Meßkabel der Dehnmeßstreifen wurden durch in Höhe der DMS in die Hüllrohre geschnittenen Öffnungen nach außen geleitet; diese Öffnungen wurden anschließend wieder verschlossen, um ein Eindringen des Frischbetons in die Hüllrohre zu verhindern.

Das Betonieren der segmentären Versuchskörper erfolgte in zwei Betonierabschnitten nach dem Kontaktverfahren; zunächst wurde nur jedes zweite Segment betoniert, wobei an den Stirnflächen der Segmente eine im Steg profilierte Schalung angebracht war (siehe Bild 2.6). 4 Tage später wurden nach Entfernen der Stirnschalungen die dazwischenliegenden Segmente hergestellt, wobei die Stirnflächen der vorher betonierten Segmente als Schalung dienten. Um eine Haftung der gegeneinander betonierten Fugenflächen zu verhindern, wurden sie vor dem Anbetonieren mit einem bituminösen Anstrich versehen.



Bild 2.6: Herstellung der segmentären Versuchsbalken in 2 Betonierabschnitten

Die Verdichtung des Frischbetons der Versuchsbalken erfolgte mit Innen- und Außenrüttler um auch die schwer zugänglichen Untergurte einwandfrei herzustellen.

Während der ersten sieben Tage nach Abschluß der Betonierarbeiten wurden die Balken unter feuchten Tüchern gelagert, die restliche Zeit bis zum Versuchsbeginn bei normalen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverhältnissen in der Versuchshalle.

2.4 Vorspannen

Zum gefahrlosen Transport und um ein vorzeitiges Aufreißen der Biegezugzone zu verhindern wurde vor dem Umsetzen der Versuchsbalken auf die Auflager der Prüfeinrichtung eine Teilvorspannung aufgebracht. Nach Aufsetzen der Balken auf die Auflagerkonstruktionen erfolgte bei den Versuchsbalken schrittweise das Vorspannen auf die vorgesehenen Vorspannkräfte wobei eine Steuerung der Pressenkräfte anhand der gemessenen Spannstahldehnungen möglich war.

Nach Beendigung der Vorspannarbeiten erfolgte das Verfüllen der Hüllrohre mit Einpreßmörtel. Das Anmischen dieses Mörtels sowie das mit einer Handpresse vorgenommene Injizieren der Hüllrohre wurde in Anlehnung an DIN 4227 Teil 5 vorgenommen.

Dem PZ 45 F wurde als Einpreßhilfe 1 % Tricosal 181 H zugesetzt. Die nach einer Erhärtungszeit von 7 Tagen (Versuchstag) bzw. von 28 Tagen an Rückstellproben ermittelten Druckfestigkeiten sind in Bild 2.7 aufgeführt.

In Bild 2.8 sind die Dehnungen bzw. Vorspannkräfte der einzelnen Spannglieder nach dem Injizieren der Hüllrohre bzw. bei Versuchsbeginn dargestellt. Die Spanngliederbezeichnungen sind aus Bild 2.1 ersichtlich. Die Spanngliedkräfte nahmen bis zum Versuchsbeginn im Mittel um 12 % ab.

Zylinder - druckfestigkeit N/mm ²	Versuchsbalken						
	SB 1	SB 2	SB 3	SB 4	SB 5	SB 6	SB 7
nach 7 Tagen	—	43,7	16,5	40,4	41,7	41,0	39,0
nach 12 Tagen	—	—	24,6	49,8	31,5	46,7	—
bei Versuchsb.	—	43,3	16,6	35,8	44,9	46,3	41,0
nach 28 Tagen	46,9	52,9	19,3	58,0	59,1	54,0	59,6

Bild 2.7: Einpreßmörtelfestigkeiten der Versuchsbalken

Versuchsbalken		Vorspannen		Versuchsbeginn	
		ϵ_v [‰]	N_v [kN]	ϵ_v [‰]	N_v [kN]
SB 1	a	2,68	310,6	2,30	266,2
	b	2,63	304,8	2,45	283,9
	c	2,75	318,8	2,42	280,4
SB 2	a	2,79	315,5	2,50	283,0
	b	2,85	322,7	2,60	294,6
	c	2,65	300,0	2,43	275,2
SB 3	a	2,71	465,3	2,27	389,4
	b	2,75	471,2	2,30	405,8
	c	2,72	466,6	2,27	389,9
SB 4	a	2,82	469,0	2,43	403,5
	b	2,66	442,6	2,45	407,0
	c	2,73	455,2	2,35	391,4
SB 5	a	2,75	321,7	2,52	294,5
	b	2,76	323,2	2,54	297,5
	c	2,79	325,7	2,54	297,5
SB 6	a	2,92	107,6	2,72	100,4
	b	2,97	109,4	2,79	102,8
	c	2,97	109,6	2,75	191,6
SB 7	a	0,31	51,2	0,09	14,2
	b	2,97	344,2	2,64	308,9
	c	0,45	75,6	0,23	38,2

Bild 2.8: Dehnungen der Spannstähle bzw. Vorspannkkräfte nach Beendigung des Vorspannens bzw. bei Versuchsbeginn. Lage der Spannstähle a, b, c siehe Bild 2.1.

3 Versuchseinrichtung

3.1 Meßstellenanordnung

Die Anordnung der Meßstellen ist im Anhang in den Bildern A 3.1 bis A 3.5 wiedergegeben. Im einzelnen wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Alle Balken waren mit Dehnmeßstellen an den Spannstählen sowie an der Betonstahl-Längsbewehrung versehen. Die genaue Lage und Anordnung dieser Dehnmeßstreifen kann den Bildern A 3.1 und A 3.2 des Anhangs entnommen werden.
- Auch die Dehnungen der Bügel wurde mit Dehnmeßstreifen in verschiedenen Querschnitten gemessen. Ihre Lage und Anordnung kann ebenfalls den Bildern A 3.1 und A 3.2 entnommen werden.
- Die Rißbildung wurde laststufenweise durch Markierungen am Balken gekennzeichnet, so daß das zu einer Laststufe gehörige Rißbild nachgezeichnet werden konnte. Die Rißbreiten wurden in ausgewählten Laststufen entlang mehrerer Meßlinien gemessen. Die Meßstellen für die Rißbreiten sind im Rißbild gekennzeichnet und durchnummeriert. Das Messen der Rißbreiten erfolgte unter Verwendung einer Videokamera, mit der die Rißbreiten an vorher festgelegten Meßpunkten aufgezeichnet und später mittels eines geeichten Maßstabes am Bildschirm ausgewertet wurden.
- Die Balkendurchbiegungen wurden mittels induktiver Weggeber an den in Anlage A 3.3 angegebenen Stellen ermittelt.
- Zur Messung der Stauchungen in der Druckzone waren im Bereich neben und zwischen den Einzellasten Meßstrecken für Setzdehnungsmesser angeordnet (Bild A 3.4).

- Die Messung der Betonverformungen im Steg erfolgte ebenfalls mit Setzdehnungsmesser. Die Lage der Setzdehnungsmeßstellen des Balkens SB 5 ist stellvertretend für die übrigen Versuchskörper in der Anlage A 3.5 aufgeführt.

Sämtliche elektronischen Messungen wurden mit einer Vielstellenmeßanlage UPH 3200 vom Typ Hottinger erfaßt, mit dem graphischen System Tektronix 4051 abgespeichert und mit Hilfe der Institutsrechenanlage PRIME 400 ausgewertet.

3.2 Belastungseinrichtung

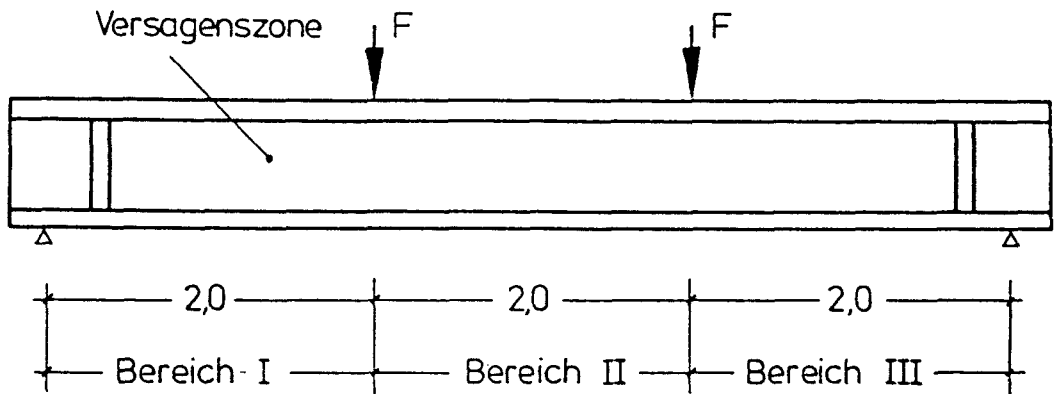
Wie schon in Abschnitt 2.1 angedeutet, war es, bedingt durch die Anordnung von drei unterschiedlich schubbewehrten Balkenbereichen möglich, in der Regel zwei bzw. maximal drei Brüche zu erzeugen. Hierzu war eine Lastumgruppierung bzw. Auflagerverschiebung notwendig; diese ist in Bild 3.1 erläutert. Wie hieraus zu ersehen ist, wurde die Schubspannweite von 2,0 m in allen 3 Belastungsstufen unverändert beibehalten.

In der ersten Belastungsstufe wurde als statisches System ein Einfeldbalken mit Einzellasten in den Drittelpunkten zugrundegelegt. Als Prüfzylinder wurden dabei zwei 1000 kN-Amlser-Pressen benutzt. Die Größe der aufgebrachten Kräfte wurde mittels einer Kraftmeßdose und eines Öldruckgebers kontrolliert. In dieser Belastungsstufe wurden auch die in /15/ beschriebenen Schwellbeanspruchungen zur Überprüfung der Gebrauchsfähigkeit vorgenommen. Nach der Schwellbeanspruchung und der Erzeugung der ersten Versagenszone wurden für die 2. Belastungsstufe die beiden Prüfzylinder in dem rechten Drittelpunkt der Spannweite angeordnet um hier im Bereich III die 2. Versagenszone zu erzeugen.

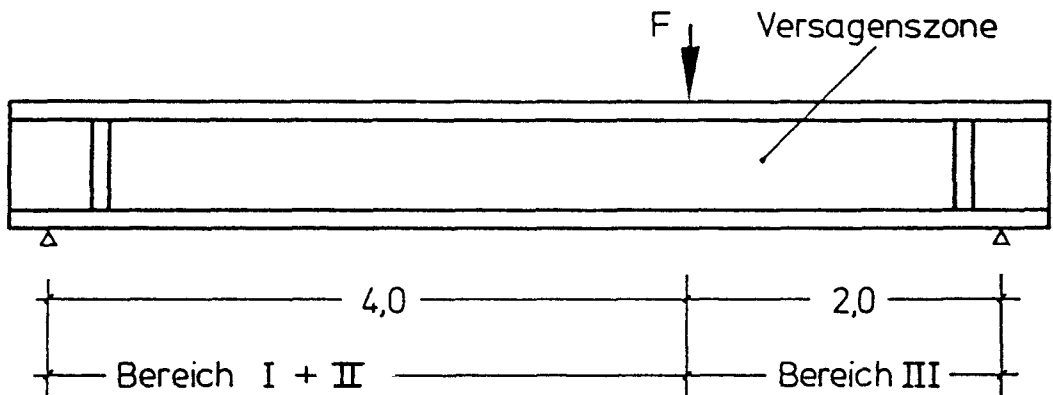
Danach erfolgte eine Versetzung des rechten Auflagers um 2,0 m nach links und damit eine Verkürzung der Spannweite um ebenfalls 2,0 m. In dem neuen System wurde die Biege- bzw. Querkraftbeanspruchung durch einen 1000 kN Prüfzy-

linder in Feldmitte erzeugt. Die Versagenszone bildete sich nun im Bereich II aus.

1. Belastungsstufe



2. Belastungsstufe



3. Belastungsstufe

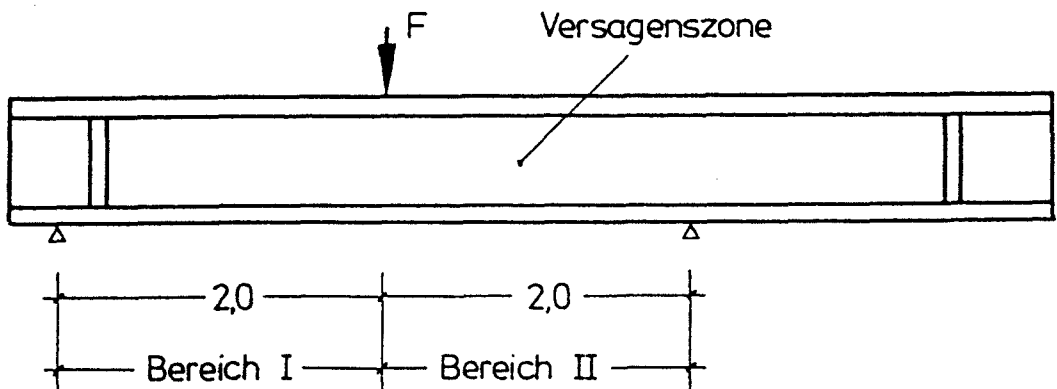


Bild 3.1: Lastanordnung bei den verschiedenen Belastungsstufen

4 Versuchsdurchführung

4.1 Allgemeines

Der Belastungsablauf war bei allen Balken dieser Versuchsserie im wesentlichen gleich.

In der ersten Belastungsstufe wurden alle Balken zunächst statisch beansprucht, wobei in insgesamt ca. 5 Laststufen die RiBlast angesteuert wurde, um nachfolgend mit kleineren Laststufen die Entwicklung der Fugenspaltbreiten bei den Segmentbalken bzw. die Erstrißbildung bei den teilweise vorgespannten Balken genauer studieren zu können.

Sämtliche Meßgrößen wurden laststufenweise registriert. Nach Erreichen der erhöhten Gebrauchslast wurde jeder Balken einer Dauerschwellbeanspruchung unterworfen um diesen Einfluß auf das Verbundverhalten der Längsbewehrung zu untersuchen (Ober- und Unterlast der Schwellbeanspruchung sowie Lastwechselanzahl siehe Bild 4.1).

Danach erfolgte stufenweise eine statische Laststeigerung bis zum Erreichen der Schubbruchlast. Um die in Bild 3.1 angesprochenen weiteren Belastungsstufen durchführen zu können wurde durch rechtzeitige Entlastung bei Erreichen des Versagenszustandes eine vollständige Zerstörung des Versagensbereiches verhindert. Konnte diese Zerstörung nicht verhindert werden, wurde unter Nichtberücksichtigung der zweiten unmittelbar mit der dritten Belastungsstufe begonnen.

Bei den übrigen Balken erfolgte eine Umgruppierung der Belastung entsprechend Bild 3.1 und danach eine stufenweise statische Laststeigerung bis zum Bruchzustand, wobei sich die Versagenszone im Bereich III ausbildete.

Nach entsprechender Lagerverschiebung wurde durch stufenweise Laststeigerung ein Versagen im Bereich II herbeigeführt.

Zur besseren Übersicht sind in Bild 4.1 in tabellarischer Form die wesentlichen experimentellen Versuchsdaten aller Balken sowie einige zugehörige rechnerische Vergleichsergebnisse einander gegenübergestellt, auf die im Verlauf der weiteren Betrachtung noch näher eingegangen wird.

Versuchsbalken /Belastungsstufe	Q_U kN	Q_R kN	Q_{gebr} kN	Q_{max}/Q_{min} kN	LW	$\mu_{s,s}$ %
SB 1 / 1	350,0	150,0	200,0	250,0 / 100,0 300,0 / 200,0	100 000 83 000	0,330
SB 1 / 2	—	—	—	—	—	0,500
SB 1 / 3	347,5	100,0	198,6	—	—	0,188
SB 2 / 1	445,0	225,0	254,3	250,0 / 100,0 300,0 / 200,0	100 000 100 000	0,660
SB 2 / 2	—	—	—	—	—	0,565
SB 2 / 3	397,0	150,0	226,9	—	—	0,377
SB 3 / 1	450,0	150,0	257,1	400,0 / 160,0	50 000	0,500
SB 3 / 2	—	—	—	—	—	0,660
SB 3 / 3	368,8	125,0	210,7	—	100 000	0,188
SB 4 / 1	627,0	250,0	358,3	450,0 / 180,0	—	0,785
SB 4 / 2	—	—	—	—	—	1,047
SB 4 / 3	612,5	150,0	350,0	—	—	0,754
SB 5 / 1	475,0	200,0	271,4	350,0 / 140,0	100 000	0,660
SB 5 / 2	633,3	200,0	361,9	—	—	1,000
SB 5 / 3	495,0	282,9	—	—	—	0,628
SB 6 / 1	280,0	150,0	160,0	200,0 / 50,0	100 000	0,283
SB 6 / 2	385,3	100,0	220,2	—	—	0,377
SB 6 / 3	225,0	128,6	—	—	—	0,226
SB 7 / 1	450,0	150,0	257,1	187,5 / 75,0	100 000	0,523
SB 7 / 2	520,0	100,0	297,1	—	—	0,628
SB 7 / 3	—	—	—	—	—	0,628

Q_{max} = Oberlast der Schwellbeanspruchung (Querkraft)

Q_{min} = Unterlast der Schwellbeanspruchung (Querkraft)

Q_U = Bruchquerkraft

Q_R = Querkraft bei Schubrißbeginn

Q_{gebr} = Querkraft des Gebrauchszustandes

LW = Lastwechselanzahl

$\mu_{s,s}$ = Bügelbewehrungsgrad = $A_{s,s} / (e_{bu} \cdot b_o)$

Bild 4.1: Experimentelle Versuchsdaten

4.2 Versuchsbalken SB 1

In 8 Laststufen wurde bei diesem segmentären Versuchsbalken zunächst statisch das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,6 MNm angefahren.

Dabei bildeten sich bei einem Biegemoment von 0,3 MNm die ersten Schubrisse und bei einem solchen von 0,5 MNm die ersten Biegerisse in der Segmentfuge aus. Danach wurde eine Biegeschwellbeanspruchung von 100 000 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,5 MNm und der Unterlast von 0,2 MNm durchgeführt. Entsprechende Messungen nach 1 000, 10 000, 20 000, 50 000 und 100 000 Lastwechseln sollten Aufschluß über den Einfluß der Schwellbeanspruchung auf das Trag- und Verformungsverhalten ergeben.

Da die Zunahme der Fugenspaltbreite infolge der Schwellbeanspruchung verhältnismäßig gering war, wurde anschließend statisch das Biegemoment von 0,7 MNm angefahren. Die zugehörige Querkraft betrug 0,35 MN. Hier zeichnete sich schon ein Schubzugbruch ab, da die Bügel im Bereich I die Fließgrenze schon längst überschritten hatten und die maximale Schubrißbreite schon 5,8 mm betrug.

Im Hinblick auf die Verbunduntersuchung der Spannstähle wurde anschließend jedoch noch eine Biegeschwellbeanspruchung mit der Oberlast von 0,6 MNm und der Unterlast von 0,4 MNm aufgebracht. Nach 83 000 Lastwechseln trat im Bereich I der Bruch ein, bedingt durch ein Versagen der Bügel (siehe Bild 4.2).

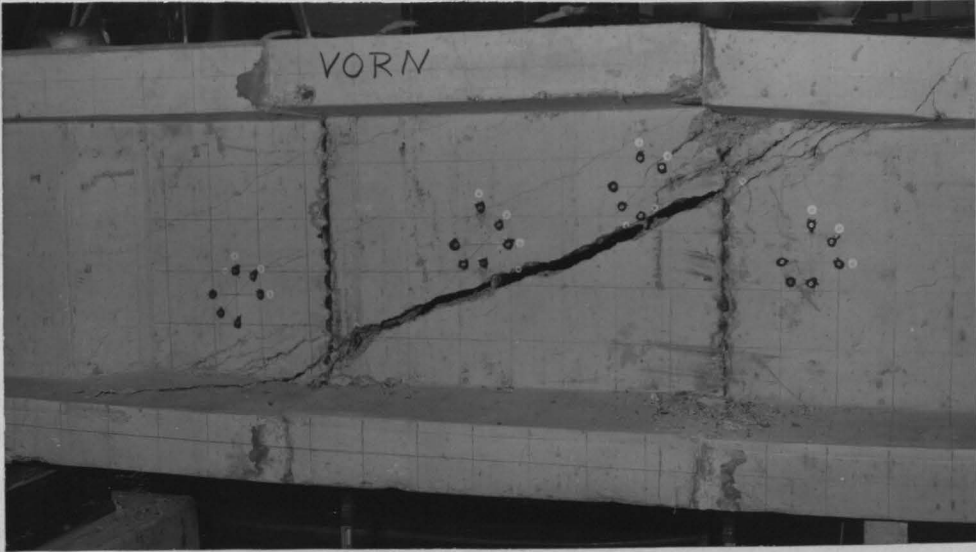


Bild 4.2: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 1 nach der 1. Belastungsstufe im Bereich I



Bild 4.3: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 1 nach der 3. Belastungsstufe

Die vorgesehene 2. Belastungsstufe konnte wegen einer zu starken Zerstörung der 1. Versagenszone (siehe Bild 4.2) nicht ausgeführt werden. Deshalb wurde anschließend das linke Auflager um 2,0 m nach rechts verschoben und die in Bild 3.1 dargestellte 3. Belastungsstufe durchgeführt. Hier wurde statisch in 25 Laststufen der Versagenszustand angesteuert. Dabei bildeten sich bei einer Querkraft von 0,1 MN die ersten Schubrisse im Bereich II. Bei einer Querkraft von 0,288 MN erreichten die Bügel in diesem Bereich die Fließgrenze.

Das Versagen (Schubzugbruch) wurde durch große Dehnungen der Bügel im Bereich II eingeleitet (siehe Bild 4.3). Die Bruchquerkraft betrug 0,348 MN.

4.3 Versuchsbalken SB 2

Der Versuchsbalken SB 2 war stärker schubbewehrt als der ansonsten vergleichbare Versuchsbalken SB 1. Die Belastung entsprach im wesentlichen derjenigen des SB 1. Auch hier wurde zuerst in statischen Laststufen das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,6 MNm angefahren. Dabei bildeten sich bei einem Biegemoment von 0,45 MNm die ersten Schubrisse.

Nach 100 000 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,5 MNm und der Unterlast von 0,2 MNm und entsprechenden Zwischenmessungen wurde nach einem anschließenden statischen Anfahren des Maximalmomentes von 0,7 MNm eine zweite Biegeschwellbeanspruchung mit 100 000 Lastwechseln und einer Oberlast von 0,6 MNm und einer Unterlast von 0,4 MNm aufgebracht.

Nach dieser Biegeschwellbeanspruchung wurde der Balken statisch zu Bruch gefahren. Die Bruchquerkraft betrug 0,445 MN. Versagensursache war ein Fließen der Bügel im Bereich I.

Wie beim Versuchsbalken SB 1 konnte der vorgesehene 2. Belastungsabschnitt wegen einer zu starken Zerstörung der 1. Versagenszone nicht ausgeführt werden. Deshalb wurde direkt nach der entsprechenden Auflagerverschiebung mit dem 3. Belastungsabschnitt begonnen. Hier wurde statisch in 20 Laststufen der Versagenszustand angesteuert. Dabei bildeten sich bei einer Querkraft von 0,15 MN die ersten Schubrisse im Bereich II. Die Bruchquerkraft betrug 0,397 MN. Versagensursache war ein Bügelfließen im Bereich II (siehe Bild 4.4).

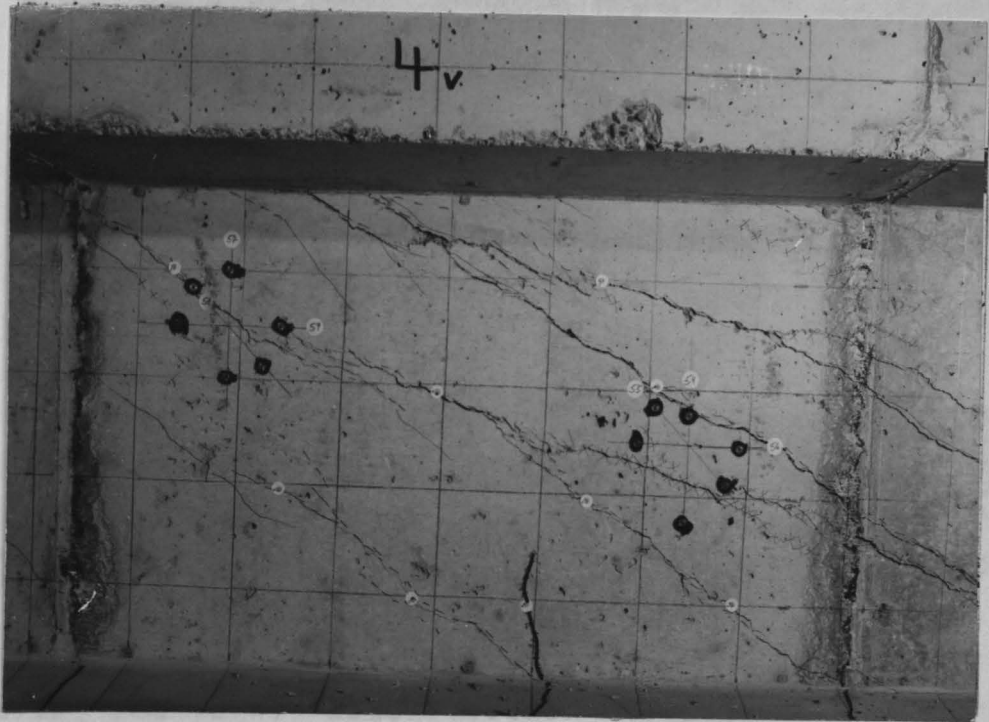


Bild 4.4: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 2 nach der 3. Belastungsstufe

4.4 Versuchsbalken SB 3

Der Versuchsbalken SB 3 war höher vorgespannt als die bisher behandelten segmentären Versuchsbalken SB 1 und SB 2, während der Schubbewehrungsgrad etwa demjenigen des Versuchsbalkens SB 2 entsprach. In 15 Laststufen wurde zunächst das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,9 MNm angefahren. Dabei kam es bei einem Biegemoment von 0,3 MNm zur Bildung von Schubrissen, bei einem Biegemoment von 0,826 MNm öffneten sich einzelne Fugen. Bei Erreichen des Biegemoments von 0,9 MNm zeichnete sich schon ein Schubzugbruch ab, da bei einem Biegemoment von 0,70 MNm schon die Bügel des Bereiches I die Fließgrenze erreicht hatten.

Im Hinblick auf die Verbunduntersuchungen der Spannstähle wurde anschließend jedoch noch eine Biegeschwellbeanspruchung mit der Oberlast von 0,8 MNm und der Unterlast von 0,32 MNm aufgebracht. Nach 49 170 Lastwechseln trat im Bereich I der Bruch ein, bedingt durch ein Versagen der Bügel (siehe Bild 4.5).

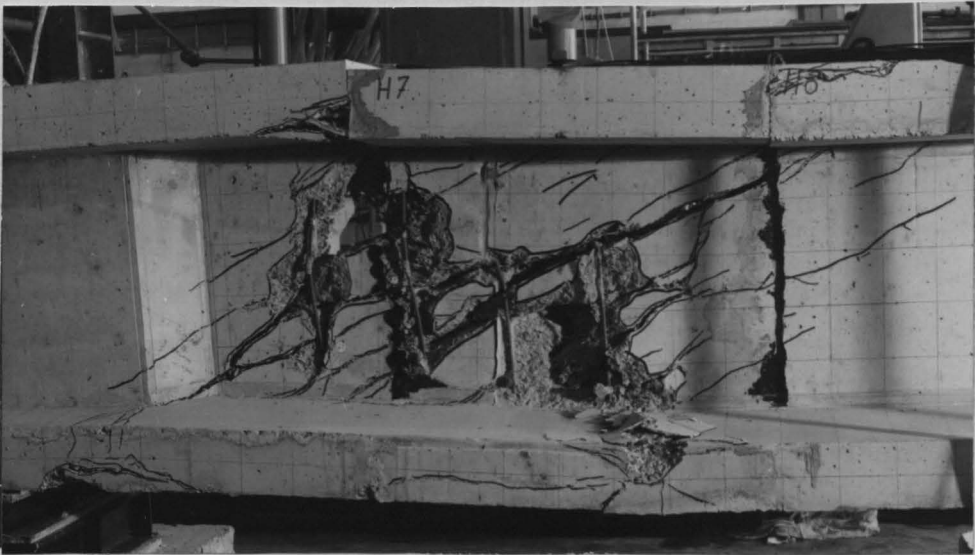


Bild 4.5: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 3 nach der 1. Belastungsstufe

Wie bei den vorher beschriebenen Versuchen konnte wegen einer zu starken Zerstörung der 1. Versagenszone (siehe Bild 4.5) die 2. Belastungsstufe nicht ausgeführt werden. Deshalb wurde direkt nach der entsprechenden Auflagerver-schiebung mit der 3. Belastungsstufe begonnen. Hier wurde statisch in 25 Laststufen der Versagenszustand ange-steuert. Dabei bildeten sich bei einer Querkraft von 0,25 MN die ersten Schubrisse im Bereich III. Die Bruch-querkraft betrug 0,369 MN. Versagensursache war ein Bü-gelfließen im Bereich II (siehe Bild 4.6).

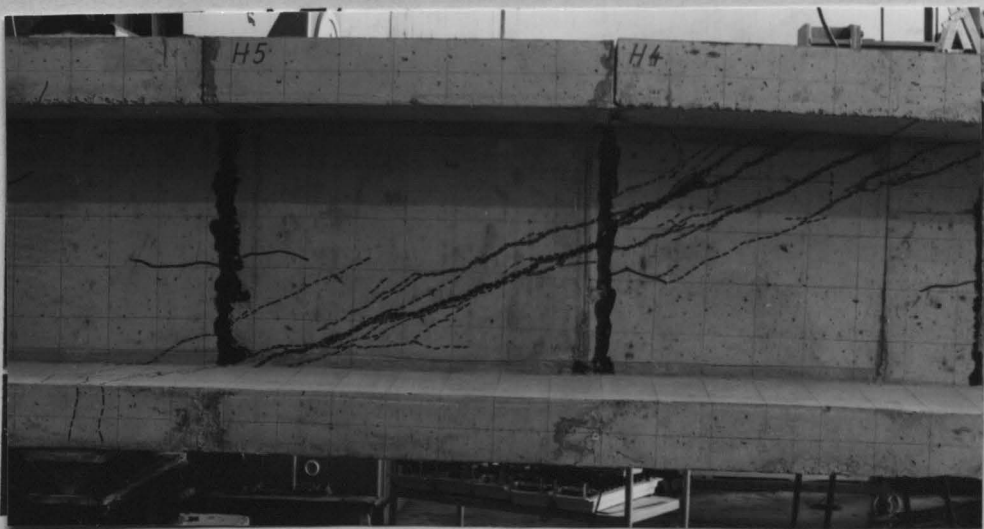


Bild 4.6: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 3 nach der 3. Belastungsstufe

4.5 Versuchsbalken SB 4

Der Versuchsbalken SB 4 war höher schubbewehrt als der Versuchsbalken SB 3, aber hinsichtlich des Vorspanngrades und der Spannbewehrung mit diesem identisch. Auch die Belastungsaufbringung entsprach im wesentlichen derjenigen des Versuchsbalkens SB 3. Es wurde zunächst statisch das erhöhte Gebrauchslastmoment von 1,0 MNm angefahren. Erste Schubrisse bildeten sich bei einem Biegemoment von 0,5 MNm.

Nach der statischen Belastung wurde eine Biegeschwellbeanspruchung von 100 000 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,9 MNm und der Unterlast von 0,36 MNm durchgeführt. Zwischenmessungen erfolgten nach 1 000, 6 000, 27 000, 35 000 und 100 000 Lastwechseln jeweils bei der Biegebeanspruchung durch die Oberlast bzw. die Unterlast. Nach dieser Biegeschwellbeanspruchung wurde der Balken statisch in 16 Laststufen zu Bruch gefahren. Bruchursache war ein Bügelfließen im Bereich I (siehe Bild 4.7). Die Bruchquerkraft betrug 0,627 MN.



Bild 4.7: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 4 nach der Spannbeton 1. Belastungsstufe

Ähnlich wie bei den vorher beschriebenen Versuchen konnte wegen einer zu starken Zerstörung der 1. Versagenszone die 2. Belastungsstufe nicht ausgeführt werden. Deshalb wurde direkt nach der entsprechenden Auflagerverschiebung mit der 3. Belastungsstufe begonnen. Hier wurde statisch in 16 Laststufen der Versagenszustand angesteuert. Dabei bildeten sich bei einer Querkraft von 0,30 MN die ersten Schubrisse im Bereich II. Die Bruchquerkraft betrug 0,613 MN. Versagensursache war ein Bügelfließen in diesem Bereich (siehe Bild 4.8).



Bild 4.8: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 4 nach der 3. Belastungsstufe

4.6 Versuchsbalken SB 5

Der Versuchsbalken SB 5 war der erste in der Reihe der teilweise vorgespannten Versuchskörper.

Nach Thürlimann /17/ beträgt der Vorspanngrad λ

$$\lambda = A_z \cdot \beta_{z,02} / (A_z \cdot \beta_{z,02} + A_s \cdot \beta_{ss}) \quad (4.1)$$

wobei A_z den Spannstahlquerschnitt mit entsprechender Fließgrenze $\beta_{z,02}$ und A_s den Betonlängsstahlquerschnitt mit der Fließgrenze β_{ss} darstellt.

Der Bereich reicht von Stahlbetonbalken mit $\lambda = 0$ bis zum Spannbetonbalken mit $\lambda = 1,0$.

Beim Versuchsbalken SB 5 betrug $\lambda = 0,77$.

In 9 Laststufen wurde bei diesem teilweise vorgespannten Versuchsbalken zunächst statisch das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,7 MNm angefahren. Die ersten Schubrisse traten bei einem Biegemoment von 0,4 MNm auf.

Nach der statischen Belastung wurde der Balken einer Biegeschwellbeanspruchung von 100 000 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,7 MNm und der Unterlast von 0,28 MNm unterworfen. Da die Biegerißbreitenzunahme infolge der Schwellbeanspruchung verhältnismäßig gering war, wurde anschließend statisch das Biegemoment von 0,8 MNm angefahren.

Danach wurde der Balken einer Biegeschwellbeanspruchung von 85 700 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,8 MNm und der Unterlast von 0,36 MNm unterworfen. Nach dieser Biegeschwellbeanspruchung wurde der Balken statisch bis zum Bruch hochgefahren. Versagenszone war der Bereich I. Die Bruchquerkraft betrug 0,475 MN. Bruchursache war ein Fließen der Bügel (siehe Bild 4.9).

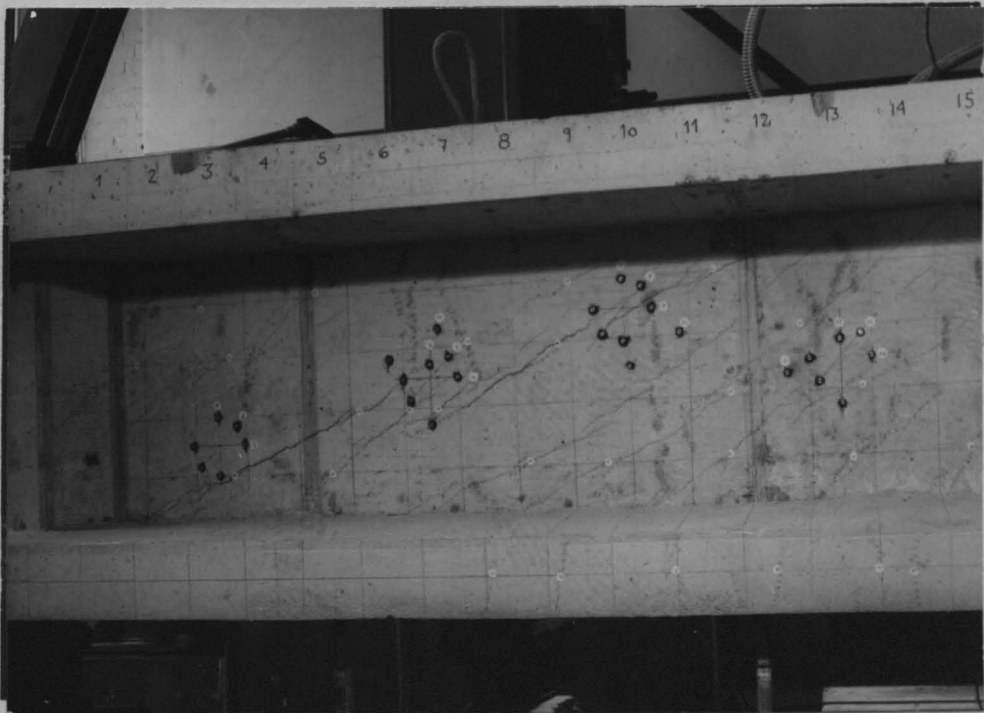


Bild 4.9: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 5 nach der 1. Belastungsstufe

Im Gegensatz zu den segmentären Versuchsbalken war hier die Zerstörung des Steges im Versagensbereich nicht so gravierend, so daß nach Lastumgruppierung der 2. Belastungsabschnitt durchgeführt werden konnte.

Hier wurde statisch in 13 Belastungsstufen der Bruch angefahren. Im bisher ungerissenen Bereich II bildeten sich bei einer Querkraft von 0,2 MN erste Schubrisse aus. Versagenszone war der Bereich III, wobei der Bruch durch Fließen der Bügel eingeleitet wurde. Die Bruchquerkraft betrug 0,633 MN.

Nach entsprechender Auflagerverschiebung und Lastumgruppierung (siehe Bild 3.1) konnte anschließend der 3. Belastungsabschnitt durchgeführt werden. Hier wurde statisch in 14 Laststufen der Versagenszustand angesteuert. Dabei kam es im Bereich II wegen einer Richtungsänderung der Schubspannungen zu einer Schubrißüberkreuzung (siehe Bild 4.10). Ein negativer Einfluß auf das Tragverhalten konnte durch diese Erscheinung jedoch nicht festgestellt werden. Versagenszone war der Bereich II (siehe Bild 4.10). Die Bruchquerkraft betrug 0,495 MN.

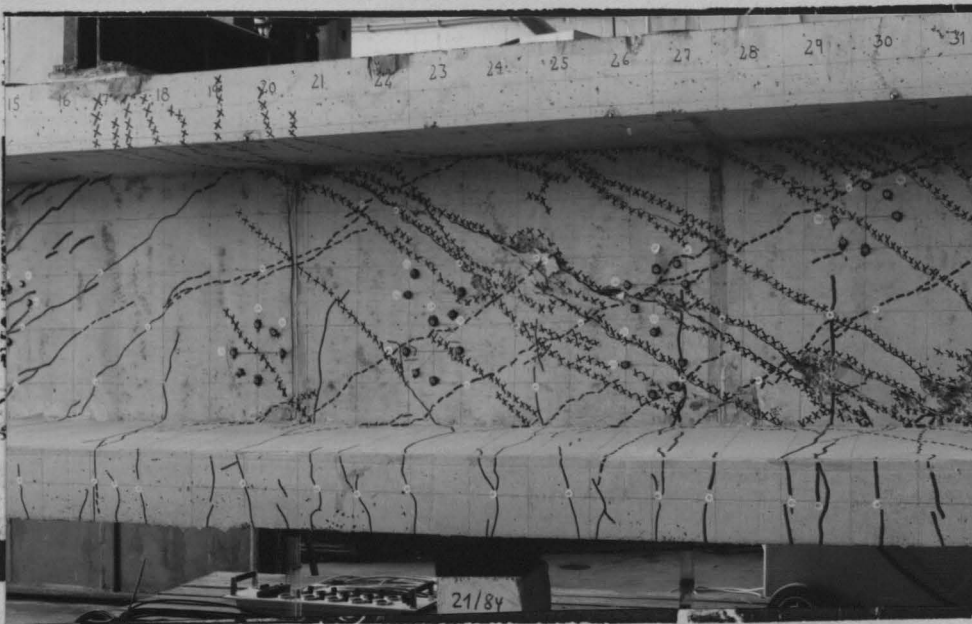


Bild 4.10: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 5 nach der 3. Belastungsstufe

4.7 Versuchsbalken SB 6

Der Vorspanngrad λ dieses Versuchsbalkens betrug 0,485; er war damit niedriger als derjenige des Versuchsbalkens SB 5. Dementsprechend war auch das Biege­rißmoment kleiner als bei den vorab dargestellten Versuchsbalken.

Zunächst wurde statisch das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,4 MNm angefahren. Dabei traten die ersten Schubrisse bei einem Biegemoment von 0,3 MNm auf.

Danach wurde eine Biegeschwellbeanspruchung von 100 000 Lastwechseln mit der Oberlast von 0,4 MNm und der Unterlast von 0,1 MNm mit entsprechenden Zwischenmessungen nach 1 000, 16 000, 40 000, 61 000, 84 500 und 100 000 Lastwechseln durchgeführt. Nach dieser ermüdenden Beanspruchung wurde der Balken statisch bis zum Bruch hochgefahren. Bruchursache des im Bereich I auftretenden Bruches war ein Bügelversagen. Die Bruchquerkraft betrug 0,28 MN.

Wie beim Versuchsbalken SB 5 war es auch hier möglich nach einer Lastumgruppierung den 2. Belastungsabschnitt durchzuführen.

Hier wurde statisch in 20 Belastungsstufen der Bruch angefahren. Im bisher ungerissenen Bereich II bildeten sich bei einer Querkraft von 0,1 MN die ersten Schubrisse aus. Bruchursache des im Bereich III auftretenden Bruches war ein Bügelversagen. Die Bruchquerkraft betrug 0,385 MN.

Nach entsprechender Auflagerverschiebung und Lastumgruppierung wurde anschließend der 3. Belastungsstufe durchgeführt. Hier wurde statisch in 12 Laststufen der Bruch angesteuert. Wie beim Versuchsbalken SB 5 kam es auch hier im Bereich II zu einer Schubrißüberkreuzung (siehe Bild 4.11). Bruchursache des im Bereich II auftretenden Schubzugbruches war ein Bügelversagen. Die Bruchquerkraft betrug 0,225 MN.

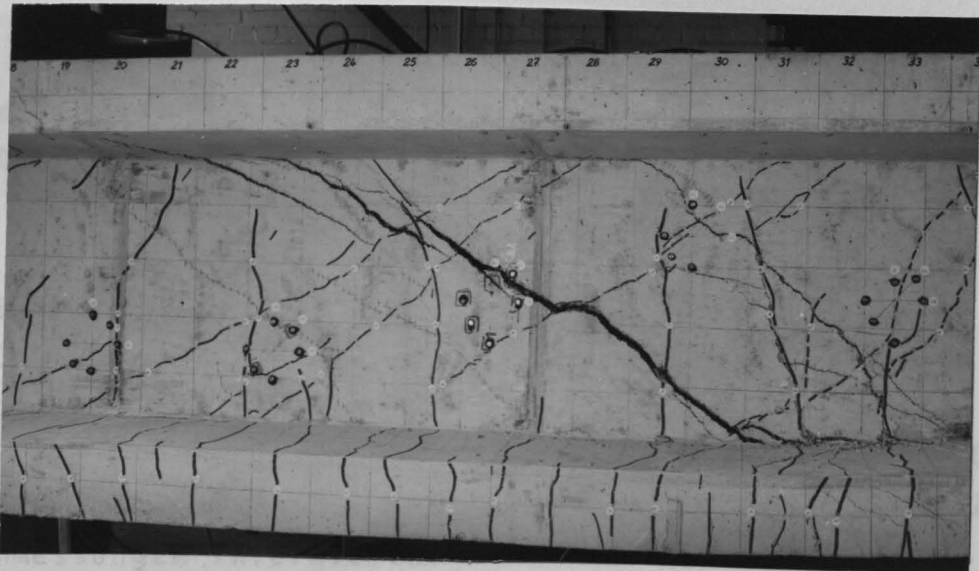


Bild 4.11: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 6 nach der 3. Belastungsstufe

4.8 Versuchsbalken SB 7

Der Versuchsbalken SB 7 war im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Versuchskörpern als T-förmiger Querschnitt mit sonst gleichen Außenmaßen ausgebildet (d.h. der Unterflansch fehlte). Um einen vorzeitigen Biegebruch zu verhindern, wurden neben dem in der Biegezugzone des Stegs in Verbund liegenden Spannstahl $\varnothing 26$ mm noch zwei außerhalb des Stegs liegende verbundlos geführte Spannglieder $\varnothing 32$ mm angeordnet (siehe Bild 4.12).

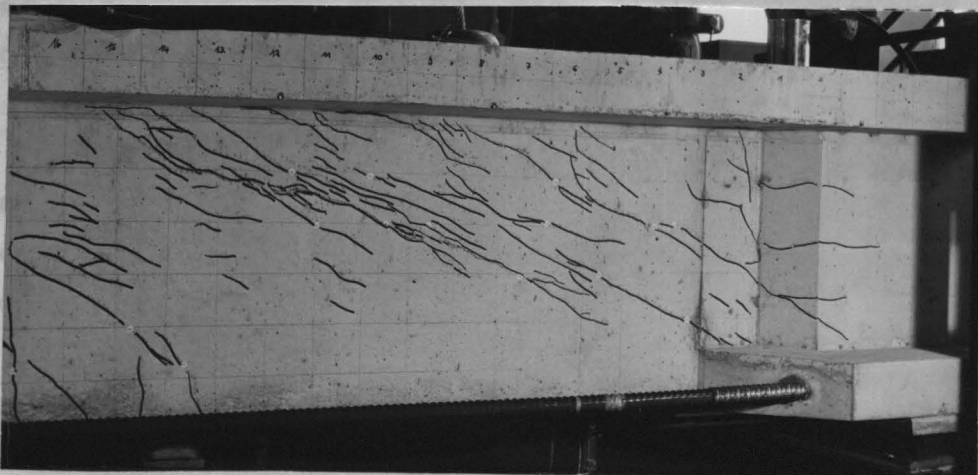


Bild 4.12: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 7 nach der 1. Belastungsstufe

In 8 Laststufen wurde zunächst das erhöhte Gebrauchslastmoment von 0,375 MNm angefahren. Bei einem Biegemoment von 0,3 MNm bildeten sich dabei die ersten Schubrisse aus.

Nach der statischen Belastung wurde der Versuchsbalken einer Biegeschwellbeanspruchung mit 100 000 Lastwechseln und der Ober- und Unterlast von 0,375 MNm bzw. 0,15 MNm unterworfen. Über den Einfluß der Schwellbeanspruchung auf das Trag- und Verformungsverhalten sollten die nach 1 000, 10 000, 19 000 und 100 000 Lastwechseln vorgenommenen Zwischenmessungen informieren.

Nach der Schwellbeanspruchung wurden die äußeren Spannungsglieder zur Vermeidung eines Biegebruchs auf 1,75 ‰ vorgespannt. In 20 Laststufen wurde das Maximalmoment von 0,9 MNm aufgebracht. Da sich hier die Gefahr eines Biegeschubbruchs abzeichnete, wurde zur Vermeidung einer zu starken Zerstörung des Balkens der 1. Belastungsabschnitt abgebrochen (siehe Bild 4.12). Die entsprechende Bruchquerkraft betrug 0,45 MN.

Nach entsprechender Lastumgruppierung war es auch hier möglich, den 2. Belastungsabschnitt durchzuführen. Hier wurde statisch in 25 Belastungsstufen der Bruch angefahren. Im bisher ungerissenen Bereich II bildeten sich bei einer Querkraft von 0,1 MN die ersten Schubrisse aus. Bruchursache des im Bereich III auftretenden Bruchs war ein Bügelversagen. Die Bruchquerkraft betrug 0,52 MN.

Durch eine zu starke Zerstörung des Versagensbereiches (siehe Bild 4.13) konnte der geplante 3. Belastungsabschnitt nicht mehr durchgeführt werden.

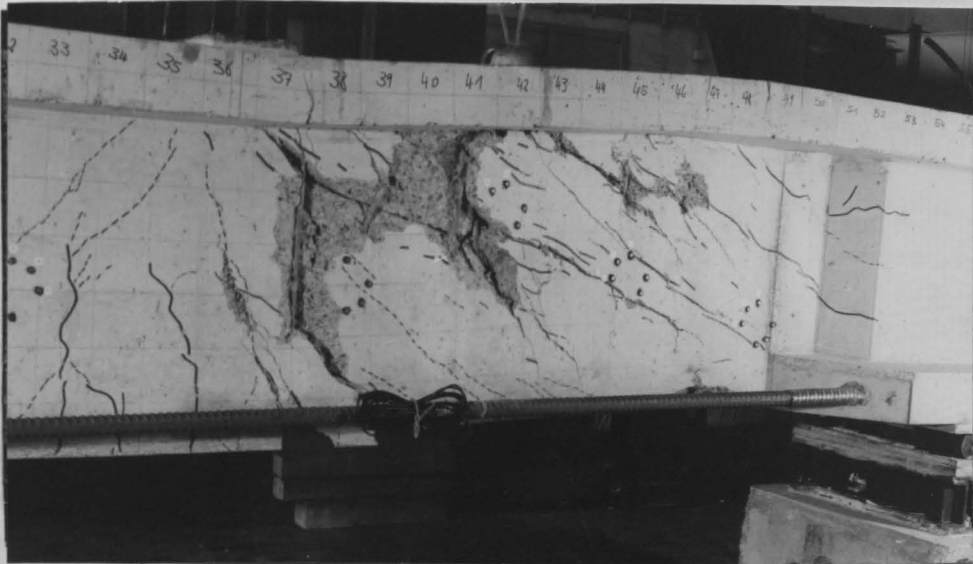


Bild 4.13: Versagenszone des Versuchsbalkens SB 7 nach dem 2. Belastungsabschnitt

5 Meßergebnisse

5.1 Allgemeines

Wegen der großen Anzahl der Meßwerte und der zugehörigen Tabellen und Bilder sind im Anhang des vorliegenden Berichtes exemplarisch die Meßergebnisse des Versuchsbalkens SB 5 in tabellarischer Form dargestellt und die laststufenweise gemessenen Beton-, Bügel-, Längsstab- und Spannstahldehnungen sowie die Balkendurchbiegungen angegeben. Außerdem sind im Anhang die aus den gemessenen Längs- Quer- und Trajektorendehnungen ermittelten Betonhauptdehnungen sowie die Darstellung der Rißbildentwicklung beinhaltet.

Sämtliche Meßergebnisse der anderen Versuchsbalken sind in dieser Weise aufbereitet und auf Anforderung erhältlich.

Nachfolgend werden die Meßergebnisse der einzelnen Versuchsbalken dargestellt und Besonderheiten des Trag- und Verformungsverhaltens diskutiert.

5.2 Balkendurchbiegungen

Die Durchbiegungen der Versuchsbalken wurden mittels induktiver Weggeber an den in Anlage dargestellten insgesamt sieben Meßpunkten laststufenweise bestimmt.

Bei der rechnerischen Kontrolle zur Interpretation der gemessenen Durchbiegungen müssen schon im ungerissenen Zustand, wegen der vorgegebenen Schubslankheit und der hohen Querkraftbeanspruchung, die Durchbiegungsanteile aus Biegung und Querkraft überlagert werden.

Bei den experimentellen Ergebnissen zeigt sich eine mit der Ribbildung beginnende starke Zunahme der Durchbiegungen.

Der Vergleich zwischen den bei gleicher Beanspruchung vor und nach der Dauerschwellbeanspruchung gemessenen Biegelinien zeigt, daß infolge der Dauerschwellbeanspruchung die Durchbiegungen zum Teil erheblich anstiegen. Dies ist im wesentlichen auf die zunehmende Ribbildung und damit auf die Belastungsgeschichte zurückzuführen.

Im gerissenen Zustand nimmt die Schubsteifigkeit noch stärker als die Biegesteifigkeit ab, so daß der Schubdurchbiegungsanteil hier noch ein stärkeres Gewicht als im ungerissenen Zustand bekommt.

5.3 Rißentwicklung

Die Biegerißentwicklung, die entscheidend von der Fuge bei den Segmentbauteilen sowie von der Verbundgüte der Spannstahl- bzw. Betonstahllängsbewehrung beeinflusst wird, ist in /15/ ausführlich dargestellt, so daß sich eine Darstellung hier erübrigt.

Im Hinblick auf eine dauerhafte Gebrauchsfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen ist es nicht nur notwendig, wie in den entsprechenden DIN-Vorschriften gefordert, geeignete Maßnahmen zur Begrenzung auftretender Biegerisse zu ergreifen, sondern auch wünschenswert, Aussagen über die Rißbreitenentwicklung auftretender Schubrisse zu erhalten, da die Gebrauchsfähigkeit der Massivbauteile durch unerwünscht breite Schubrisse erheblich beeinträchtigt werden kann.

Zur Begrenzung auftretender Schubrisse sind auch deshalb besondere Maßnahmen zu ergreifen, da im Gegensatz zu Biegerissen, bei denen die Biegezugbewehrung i.a. senkrecht zu ihrer Richtung verläuft, die Schubrisse von der einliegenden Schubbewehrung meist unter einem Winkel $\alpha \leq 90^\circ$ gekreuzt werden. Im folgenden sollen deshalb die während der Durchführung der Versuche gemessenen Schubrißbreiten ausgewertet und die daraus herleitbaren Ergebnisse diskutiert werden.

Die Erstschubrißbreiten lagen einheitlich für alle Versuchsbalken zwischen 0,03 und 0,35 mm, die jeweils gemessenen größten Schubrißbreiten lagen zwischen 0,92 und 1,74 mm.

In allen Fällen streuten die bei gleichen Lasten gemessenen Schubrißbreiten ungewöhnlich stark. Die Gebrauchsfähigkeit wurde durch Schubrisse bei keinem der Balken beeinträchtigt. Die noch als befriedigend anzusehende mittlere Schubrißbreite von 0,20 mm bildete sich erst oberhalb des Gebrauchslastzustandes aus.

Während der Belastungsphase 1 wurde jeder Versuchskörper einer Dauerschwellbeanspruchung unterworfen. Neben der Erzeugung neuer Schubrisse und der Verlängerung vorhandener Risse bewirkte diese praxisähnliche Lastwechselbeanspruchung jedoch eine gravierende Zunahme der Schubrißbreiten.

Bei den segmentären Versuchsbalken war eine nur unwesentliche Beeinflussung der Schubrißentwicklung durch die Segmentfugen festzustellen. Fast alle Schubrisse kreuzten die Fugen unbeeinträchtigt und nur vereinzelt endete ein Riß in einer Fuge oder erfuhr durch diese eine Richtungsänderung.

5.4 Spannstahl- und Betonstahldehnungen

Während des Vorspannens erfolgte das Messen der Spannstahldehnungen vornehmlich um während des Vorspannvorgangs die Spannkkräfte zu kontrollieren. Damit war gewährleistet, daß alle in der vorgedrückten Zugzone liegenden Spannglieder eine weitgehend gleichmäßige Vordehnung erhielten.

Die während der Versuchsdurchführung gemessenen Spannstahldehnungen ergeben zum einen Aufschluß über die Schwingbreite während der Schwellbeanspruchung und die

Veränderung des Verbundes, zum anderen gestatten sie Aussagen auch über die Zugkraftlinie infolge der Lastkombination Biegung und Querkraft im gerissenen Zustand.

Die Auswertung der Dehnungen der Betonstahllängs- als auch der Spannstahlbewehrung zeigt, daß im Bruchlastbereich die gemessenen Dehnungen unter den Fließdehnungen liegen.

Anhand der gemessenen Bügeldehnungen konnte zum einen überprüft werden, ob mit Erreichen der Bruchlasten ein Fließen der Bügelbewehrung eingetreten war. Zum anderen erlaubte die Auswertung der gemessenen mittleren Bügeldehnungen eine Aussage über die Tragwirkung der Balken.

5.5 Betonverformungen

Das Messen der Betonverformungen in den Stegbereichen erfolgte mit Hilfe von Meßbrosetten und weiteren Setzdehnungs-Meßstellen, die an ausgewählten Stellen parallel zur Schubrißrichtung angeordnet wurden.

Die im Bruchlastbereich gemessenen mittleren Betondruckstrebenstauchungen lagen zwischen 1,23 und 1,91 ‰. Die an einzelnen Versuchsbalken gemessenen größten Betondruckstrebenstauchungen betrugen zwischen 1,70 ‰ und 2,83 ‰.

6 Analyse des Tragverhaltens

6.1 Vergleich mit geltenden Bemessungsvorschriften

Die augenblicklich gültigen Schubbemessungsvorschriften nach DIN 4227 Teil 1 /11/ und der CEB-FIP-Mustervorschrift /14/ wurden auf der Grundlage der erweiterten Fachwerkanalogie entwickelt. Während die klassische Fachwerkanalogie mit 45° geneigten Druckstreben der Schubbewehrung noch die gesamten Stegzugkräfte zuweist, ist nach DIN 4227 Teil 1 und CEB/FIP-Mustervorschrift eine geringere Schubbewehrung erforderlich. Beide Normen berücksichtigen, daß einerseits die Biegedruckzone, die Rißverzahnung und die Dübelwirkung der Längsbewehrung zur Querkraftaufnahme beitragen und andererseits die tatsächliche Neigung der Druckstreben geringer als 45° ist, was zu einer weiteren Entlastung der Schubbewehrung führt.

Um die von der klassischen Fachwerkanalogie abweichenden Tragwirkungen zu erfassen, werden in DIN 4227 Teil 1 und der CEB/FIP-Mustervorschrift formal zwei unterschiedliche Wege eingeschlagen. Beim "Standard-Verfahren" nach CEB-FIP ergibt sich die Schubtraglast aus einem Fachwerkanteil mit einer Druckstrebenneigung von 45° und einem Betonanteil, der die übrigen Querkrafttragwirkungen zusammenfaßt. Dagegen ermitteln DIN 4227 Teil 1 und das "verfeinerte Verfahren" nach CEB-FIP die höhere Tragfähigkeit gegenüber der klassischen Fachwerkanalogie durch eine Änderung der Druckstrebenneigung. Diese wird soweit reduziert, daß sowohl die tatsächliche Verringerung der Druckstrebenneigung als auch die übrigen Querkrafttragwirkungen erfaßt werden. Bei DIN 4227 Teil 1 führt dieser Umweg zu einer fiktiven Druckstrebenneigung, die weder mit der tatsächlichen Druckstrebenneigung noch mit der Schubrißneigung übereinstimmt; es ergibt sich ebenfalls ein konstanter Betontraganteil, der unabhängig von der Belastungshöhe und dem Schubbewehrungsgrad ist.

Nachfolgend werden die rechnerischen Schubtraglasten nach DIN 4227 Teil 1 und der CEB/FIP-Mustervorschrift mit den Versuchsergebnissen verglichen. Die hierfür benötigten Tragfähigkeitsgleichungen sind in Bild 6.1 zusammengestellt. Bei DIN 4227 Teil 1 sind nur die Gleichungen für den Schubnachweis in Zone b angegeben, da einerseits die Verhältnisse von Zone a (der Zuggurt bleibt in der Schubzone auch unter der Bruchlast ungerissen) nur selten vorliegen und andererseits Zone a auch nach den für Zone b gültigen Ansätzen nachgewiesen werden darf.

In Bild 6.1 bedeuten:

μ_{ss}	=	Bügelbewehrungsgrad	=	$A_{s,s} / (e_{Bü} \cdot b_o)$
$e_{Bü}$	=	Bügelabstand		
$A_{s,s}$	=	Bügelquerschnitt		
b_o	=	Stegbreite		
ϑ	=	Neigungswinkel der Druckstreben		
α	=	Neigung der Bügel		
τ_R	=	$Q_u / (b_o \cdot z)$		
z	=	Hebelarm der inneren Kräfte		
h	=	Statische Höhe		
β_p	=	Prismenfestigkeit		
$\beta_{s,s}$	=	Streckgrenze der Bügel		
β_1	=	Vorspanngradfaktor		
M_o	=	Dekompressionsmoment		
M_u	=	Biegebruchmoment		
Q_s, Q_b, Q_v, Q_D		Erklärung siehe Gl. 6.1		

Bei der Bestimmung der Schubtraglast wird zwischen den Brucharten Versagen der Schubbewehrung und Versagen der Betondruckstreben unterschieden. Der Nachweis der Druckstrebentragfähigkeit erfolgt bei den untersuchten Bemessungsvorschriften durch eine Beschränkung der maximal aufnehmbaren Schubspannungen. Aus Tabelle 6.1 wird deutlich, daß bei der CEB/FIP-Mustervorschrift eine lineare Abhängigkeit zwischen oberer Schubspannungsgrenze und Betonfestigkeit vorausgesetzt wird, während in DIN 4227 Teil 1 das Verhältnis Bruchschubspannung zu Betonfestigkeit mit steigender Betongüte abnimmt.

DIN 4227/1	<p><u>Versagen der Schubbewehrung</u></p> $Q_u = \mu_{s,s} \cdot \beta_{s,s} \cdot b_o \cdot z (\cot \vartheta + \cot \alpha) ; \quad Q_u \leq Q_D$ <p>mit : $\tan \vartheta = 1 - \frac{\Delta \tau}{\tau_R} ; \quad \tan \vartheta \geq 0,4$</p> <p>$\Delta \tau = 60\%$ der Werte von Zeile 50, Tab.9, DIN 4227/1</p> <p><u>Druckstrebenversagen:</u></p> $Q_D = b_o \cdot z \cdot \text{zul.} \tau_R \quad \text{zul.} \tau_R \text{ Z.56-61, Tab.9, DIN 4227/1}$
Verfeinerte Methode CEB	<p><u>Versagen der Schubbewehrung</u></p> $Q_u = Q_b + Q_s + Q_v ; \quad Q_u \leq Q_D$ <p>mit : $Q_b = 2,5 \tau_{RD} \cdot b_o \cdot h$ für $Q_u \leq 2,5 \tau_{RD} b_o h$ $Q_b = 0$ für $Q_u \geq 7,5 \tau_{RD} b_o h$</p> $\tau_{RD} \cong 0,05 \beta_p^{2/3}$ $Q_s = \mu_{s,s} \cdot \beta_{s,s} \cdot b_o \cdot 0,9 h \sin \alpha (\cot \vartheta + \cot \alpha)$ $3/5 \leq \tan \vartheta \leq 5/3$ <p><u>Druckstrebenversagen:</u></p> $Q_D = b_o \cdot h \cdot 0,3 \beta_p \cdot \sin^2 \vartheta$
Standard Methode CEB	<p><u>Versagen der Schubbewehrung</u></p> $Q_u = Q_b + Q_s + Q_v ; \quad Q_u \leq Q_D$ <p>mit : $Q_b = 2,5 \tau_{RD} b_o \cdot h \cdot \beta_1 ; \tau_{RD} \cong 0,05 \beta_p^{2/3} ; \beta_1 = 1 + \frac{M_o}{M_u}$</p> $Q_s = \mu_{s,s} \cdot \beta_{s,s} \cdot b_o \cdot 0,9 h (1 + \cot \alpha) \sin \alpha$ <p><u>Druckstrebenversagen:</u></p> $Q_D = b_o \cdot h \cdot 0,3 \beta_p$

Bild 6.1: Schubtragfähigkeitsansätze nach der CEB/FIP- Mu- stervorschrift und nach DIN 4227 Teil 1

Mit Ausnahme der "verfeinerten Methode" nach der CEB/FIP-Mustervorschrift wird von allen übrigen Rechenansätzen für die von der klassischen Fachwerkanalogie abweichende Tragwirkungen ein konstanter Betonabzugswert angesetzt. Während nach DIN 4227/1 der Betontraganteil allein von der Betonfestigkeit abhängt, wird beim "Standard-Verfahren" nach CEB-FIP neben der Betonfestigkeit die Höhe der Vorspannung berücksichtigt, indem der Betontraganteil um den Faktor $(1 + M_0/M_u)$ vergrößert wird.

In Bild 6.2 sind die experimentellen Bruchquerkräfte mit den rechnerischen Traglasten nach DIN 4227 Teil 1 und den beiden Verfahren der CEB/FIP-Mustervorschrift verglichen. Dabei zeigt sich, daß die Vorschriften bei allen Versuchsbalken ein Versagen der Schubbewehrung voraussagen, wie dies auch bei den Versuchen beobachtet wurde.

Neben den Bruchlasten ist in Bild 6.2 auch das Verhältnis der Schubtraglast zu den rechnerischen Bruchquerkräften der jeweiligen Vorschriften angegeben. Hieraus wird deutlich, daß das CEB-Standardverfahren am besten in der Lage ist, die Traglast der Versuchsbalken voraus zu sagen. Es ist so aufgebaut, daß ein kontinuierlicher Übergang bei der Schubbemessung von der Stahlbetonbauweise bis hin zur vollen Vorspannung erfolgt. Mit dem Bemessungsansatz nach DIN 4227 Teil 1 und der "verfeinerten Methode" nach der CEB/FIP-Mustervorschrift werden wichtige Einflußgrößen auf das Schubtragverhalten, wie diejenige des Vorspanngrades, nur unbefriedigend erfaßt.

Es ist allerdings zu beachten, daß alle 3 Vorschriften die experimentellen Traglasten stark unterschätzen. Dies wird auch aus Bild 6.3 deutlich, in dem die experimentellen bzw. theoretischen Traglasten in Abhängigkeit vom Bügelbewehrungsgrad aufgetragen sind. Mit aufgeführt ist in diesem Bild auch die klassische Fachwerkanalogie. Hier kann durch Vergleich mit diesen Traglastkurven die Größe des tatsächlichen Betonabzugswertes abgeschätzt werden.

Versuchsbalken	$\mu_{s,s}$	$Q_{u, \text{test}}$	$Q_{u, 4227}$	$\frac{Q_{u, \text{St}}}{\text{CEB/FIP}}$	$\frac{Q_{u, \text{Verf.}}}{\text{CEB/FIP}}$	$\frac{Q_{u, \text{test}}}{Q_{u, 4227}}$	$\frac{Q_{u, \text{test}}}{Q_{u, \text{St}}}$	$\frac{Q_{u, \text{last}}}{Q_{u, \text{Verf.}}}$
SB 1 / 1	0,330	350,0	183,1	308,6	228,9	1,912	1,134	1,529
SB 1 / 3	0,183	347,5	134,6	271,1	175,2	2,582	1,282	1,983
SB 2 / 1	0,565	445,0	254,3	360,3	307,7	1,750	1,235	1,446
SB 2 / 3	0,377	397,0	187,5	308,5	230,7	2,117	1,287	1,721
SB 3 / 1	0,500	450,0	236,2	381,4	292,6	1,905	1,180	1,538
SB 3 / 3	0,108	368,8	134,5	292,9	178,4	2,741	1,259	2,067
SB 4 / 1	0,785	627,0	328,8	451,4	413,9	1,907	1,389	1,515
SB 4 / 3	0,754	612,5	318,7	444,8	397,2	1,922	1,377	1,542
SB 5 / 1	0,667	475,0	255,4	365,4	308,8	1,860	1,300	1,538
SB 5 / 2	1,005	633,3	343,3	439,5	440,7	1,845	1,441	1,437
SB 5 / 3	0,628	495,0	252,4	362,9	305,7	1,961	1,364	1,619
SB 6 / 1	0,283	280,0	160,3	236,3	202,2	1,747	1,185	1,385
SB 6 / 2	0,377	385,3	186,1	258,6	231,2	2,060	1,482	1,658
SB 6 / 3	0,226	225,0	143,2	222,1	183,2	1,571	1,013	1,228
SB 7 / 1	0,523	450,0	225,5	349,6	279,5	1,996	1,287	1,610
SB 7 / 2	0,628	520,0	254,3	373,0	309,2	2,045	1,398	1,682
Mittelwert						1,995	1,288	1,594
Standardabw.						0,284	0,118	0,099
Variationskoeff.						0,430	0,601	0,072

Bild 6.2: Gegenüberstellung der experimentellen Bruchquerkräfte mit den rechnerischen Traglasten nach DIN 4227 Teil 1 und dem Standard- bzw. verfeinerten Verfahren der CEB/FIP-Mustervorschrift

Zur Erstellung der Traglastkurve nach dem CEB/FIP-Standardverfahren wurde ein mittlerer Vorspanngradfaktor β_1 von 1,5 angesetzt. Zur besseren Voraussage der Schubtraglast scheint bei dem CEB/FIP-Standardverfahren eine Korrektur des Betontraganteiles notwendig. Hierzu ist jedoch eine Parameteruntersuchung an einer größeren Zahl von schubbeanspruchten Versuchsbalken notwendig. Nachfolgend wird zu diesem Zweck auf die von Hegger /18/ zusammengestellten experimentellen Daten zurückgegriffen.

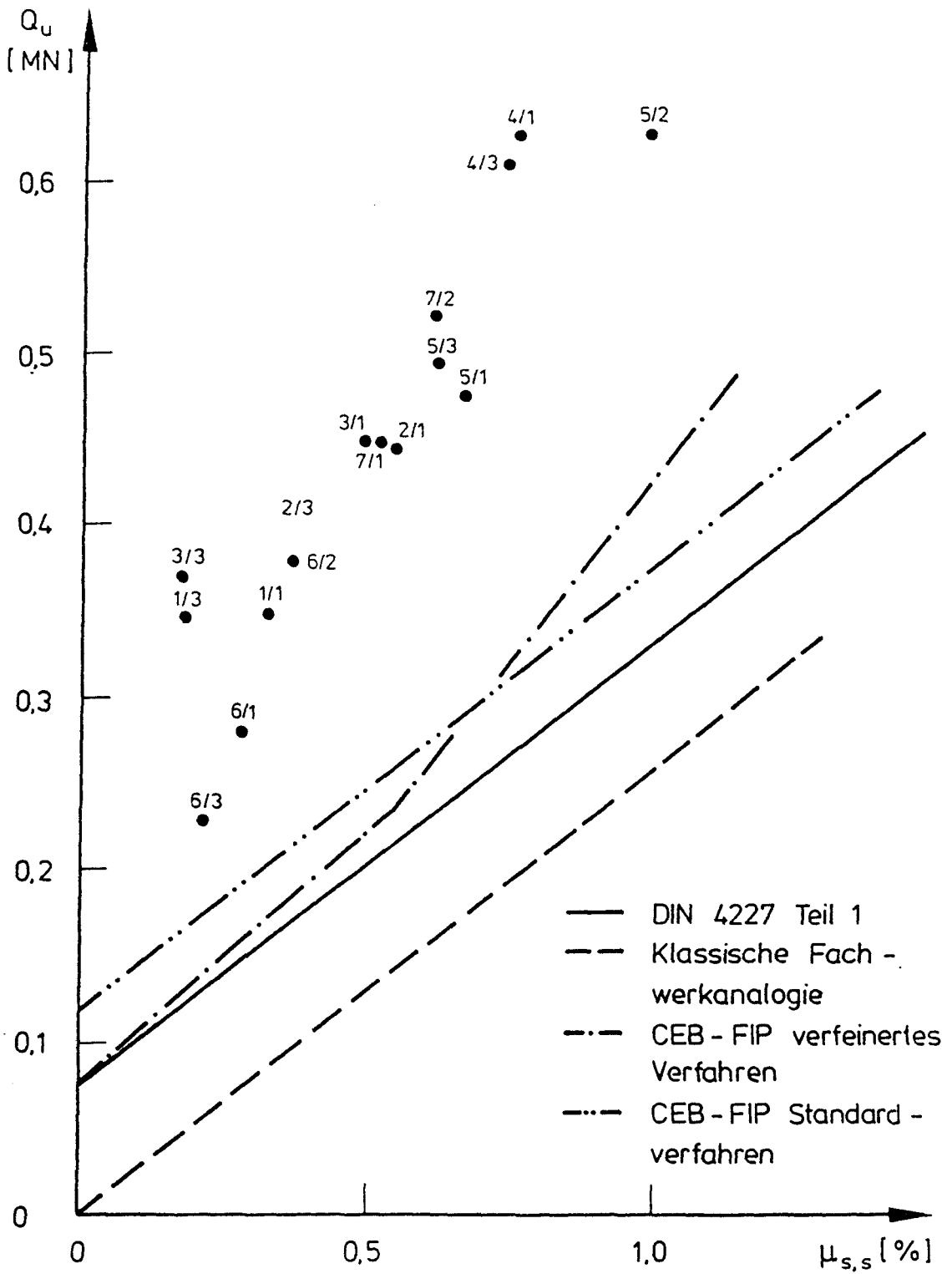


Bild 6.3: Abhängigkeit der Bruchquerkraft der Versuchsbal-
ken vom Schubbewehrungsgrad

6.2 Einflußparameter auf das Schubtragverhalten

Die Querkrafttragfähigkeit eines Stahlbeton- oder Spannbetonbalken setzt sich aus mehreren Tragwirkungen zusammen, die entsprechend den geometrischen Verhältnissen, dem Bewehrungsgehalt und der Belastungshöhe unterschiedlich groÙe Anteile besitzen. Im wesentlichen sind folgende Schubtragwirkungen festzustellen:

- Dübelwirkung der Längsbewehrung
- Vertikalkomponente der RiÙverzahnung
- Vertikalkomponente der Spannglieder
- Querkraftanteil der Schubbewehrung

Die maximale Schubtragfähigkeit im Bruchzustand ergibt sich aus der Summe der Einzeltragwirkungen. Um die Bruchtragfähigkeit wirklichkeitsnahe zu bestimmen, ist es daher erforderlich, mit einem Bemessungsmodell zu arbeiten, das die verschiedenen Tragwirkungen nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ richtig erfaÙt.

Zur Beurteilung dieser Bemessungsansätze bzw. zur Darstellung der Einflußparameter auf das Schubtragverhalten ist eine Aufbereitung der experimentellen Versuchsdaten notwendig. Hierzu wurden von Hegger /18/ nur solche Versuchsbalken aus der Literatur ausgewählt, die eindeutig auf Schub versagten, d.h. die Schubbruchlast war geringer als die Biegebruchlast. Eine Zusammenstellung der Daten der ausgewählten Versuche ist im Anhang der Arbeit von Hegger /18/ erfolgt. Einen Überblick über die wesentlichen Einflußparameter gibt Bild 6.4, wo Kleinstwert, Größt- wert und Mittelwert der Parameter aufgeführt sind.

Parameter der ausgewerteten 260 Stahlbetonbalken			Kleinstwert	Größtwert	Mittelwert
Betongüte	β_w	[N/mm ²]	11	68	29
Schubbewehrungsgrad	$\mu_{s,s} = \frac{A_{s,s}}{e_{b\ddot{u}} \cdot b_0}$		0,05 %	3,2 %	0,58 %
Längsbewehrungsgrad	$\mu_L = \frac{A_s \cdot A_z}{h \cdot b_0}$		0,6 %	5,0 %	2,9 %
Stegbreite	b_0	[cm]	6	25	17
Bauteilhöhe	d	[cm]	26	55	39
Schubslankheit	$\lambda = a/h$		1,6	7,0	3,2

Parameter der ausgewerteten 1 Spannbetonbalken			Kleinstwert	Größtwert	Mittelwert
Betongüte	β_w	[N/mm ²]	21	78	47
Schubbewehrungsgrad	$\mu_{s,s} = \frac{A_{s,s}}{e_{b\ddot{u}} \cdot b_0}$		0,04 %	3,3 %	0,80 %
Längsbewehrungsgrad	$\mu_L = \frac{A_s \cdot A_z}{h \cdot b_0}$		0,7 %	5,0 %	3,2 %
Stegbreite	b_0	[cm]	2,5	30	9
Bauteilhöhe	d	[cm]	25	97	43
Schubslankheit	$\lambda = a/h$		20	6,0	3,4
Vorspanngrad	M_0 / M_u		0,0	0,76	0,29

Bild 6.4: Kleinstwert, Größtwert und Mittelwert der Parameter der ausgewerteten Versuche

Wie der vorangegangene Vergleich der eigenen experimentellen Untersuchungen mit den verschiedenen Bemessungsansätzen zeigte, eignet sich das CEB/FIP-Standardverfahren am besten zur Bestimmung der Schubtraglast. Allerdings sind hier noch einige Modifikationen vorzunehmen. Dies soll nachfolgend anhand der in /18/ zusammengestellten Versuchsdaten geschehen. Es wird dabei im wesentlichen auf die Arbeit von Hegger zurückgegriffen.

Bei dem Ansatz nach dem CEB/FIP-Standardverfahren setzt sich die Schubtragfähigkeit Q_u für die Brucharten Schubzugbruch und Biegeschubbruch aus 3 Anteilen zusammen:

$$Q_u = Q_s + Q_b + Q_v \leq Q_D \quad (6.1)$$

Q_s = Querkraftanteil der Schubbewehrung

Q_b = Betontraganteil

Q_v = Querkraftanteil geneigter Spannglieder

Q_D = Tragfähigkeit der Druckstreben

Der Querkraftanteil der Schubbewehrung Q_s wird mit Hilfe eines Fachwerkmodells, dessen Druckstrebenneigung 45° beträgt, bestimmt.

$$Q_s = \mu_{s,s} \cdot b_0 \cdot 0,9 \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot (1 + \cot \alpha) \cdot \beta_{s,s} \quad (6.2)$$

Der Querkraftanteil geneigter Spannglieder kann direkt aus der Vertikalkomponente der Spanngliedkraft ermittelt werden.

$$Q_v = N_v \cdot \sin \alpha \quad (6.3)$$

Für N_v ist die Vorspannkraft im Gebrauchszustand anzusetzen, da Versuche gezeigt haben, daß der Spannungszuwachs der Spannglieder im Querkraftbereich nur gering ist und daher vernachlässigt werden kann.

Allerdings ist der günstige Einfluß von geneigten Spanngliedern an End- und Zwischenauflagern nur dann gesichert, wenn bei höherer Lage der Spanngliedverankerung am unteren Trägersrand eine ausreichend schlaaffe Längsbewehrung vorhanden ist.

Mit dem Betontraganteil Q_b werden die Querkraftanteile aus Ribverzahnung, Dübelwirkung der Längsbewehrung, der Traganteil des geneigten Druckgurtes und die von einem 45° -Fachwerk abweichende Tragfähigkeit der Schubbewehrung zusammengefaßt. Zur Beschreibung der Einflußgrößen auf den Betontraganteil wird folgender Produktansatz gewählt.

$$Q_b = f_b \cdot f_L \cdot f_F \cdot f_v \cdot \Delta \tau \cdot h \cdot b_0 \quad (6.4)$$

Hierin bedeuten:

- f_b = Beiwert für die Betonfestigkeit
- f_L = Beiwert für den Längsbewehrungsgrad
- f_F = Beiwert für die Querschnittsform
- f_V = Beiwert für den Vorspanngrad
- $\Delta\tau$ = Grunds Schubspannung des Betontraganteils.

Die Funktion der Einflußparameter wird mit Hilfe der ausgewerteten Versuchsbalken bestimmt.

Danach ergeben sich folgende Funktionen

$$f_b = \sqrt{B_{ws}} \quad (6.5)$$

Dies bedeutet, daß eine höhere Betonfestigkeit nicht nur die Schubtragfähigkeit gegenüber Druckstrebenversagen, sondern auch die Schubzugbruchtragfähigkeit steigert.

Die Zunahme des Beiwertes f_L mit steigendem Längsbewehrungsgrad kann mit dem Ansatz

$$f_L = \sqrt[3]{\mu_L} \quad (6.6)$$

beschrieben werden. Hierbei ist μ_L der auf die Stegfläche $A_{\text{Steg}} = b_0 \cdot h$ bezogene Längsbewehrungsgehalt aus Betonstahl A_s und Spannstahl A_v in Prozent. Der Anstieg des Betontraganteils infolge steigender Längsbewehrung ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß dadurch die Dehnsteifigkeit des Zuggurtes vergrößert wird und größere Querkräfte über die Dübelwirkung der Längsbewehrung übertragen werden.

Die Querschnittsform kann mit dem Ansatz

$$f_F = 0,70 + 0,15 \cdot b/b_0 \leq 1,0 \quad (6.7)$$

berücksichtigt werden. Hier wird vor allem der Tatsache Rechnung getragen, daß Plattenbalken einen größeren Betontraganteil haben als Rechteckquerschnitte mit gleicher Stegfläche. Diese Tragfähigkeitserhöhung ist auf die größere Querschnittsfläche des Plattenbalkendruckgurtes zurückzuführen.

Wie schon in Abschnitt 6.1 erläutert, erhöht sich mit zunehmendem Vorspanngrad die Schubtragfähigkeit. Hierfür gibt es mehrere Gründe: Zunächst können sich von Biegerissen ausgehende Schubrisse in der Regel nicht bilden, da der Zuggurt aufgrund der Vorspannung meist ungerissen bleibt. Da auch die auftretenden Hauptzugspannungen im Steg infolge Vorspannung geringer sind, erfolgt eine Schubrißbildung mit zunehmendem Vorspanngrad bei höherer Belastung. Weiterhin bewirkt ein hoher Vorspanngrad flacher geneigte Schubrisse, die zu einer geringeren Neigung der Druckstreben im Steg und infolgedessen zu einer weiteren Entlastung der Schubbewehrung führen.

Versuche von Leonhard/Koch/Rostásy /12/, bei denen die Bügelspannung entlang der Balkenachse gemessen wurden, zeigen, daß der Einfluß der Vorspannung auf das Schubtragverhalten sowohl im auflagernahen Bereich mit ungerissener Zugzone (Zone a) als auch im Bereich mit gerissener Zugzone (Zone b) wirksam ist. In Zone b waren die gemessenen Bügelspannungen gegenüber Zone a nur wenig größer. Die auch in Zone b im Vergleich zu Stahlbetonbalken geringeren Bügelspannungen sind darauf zurückzuführen, daß aufgrund der Vorspannung einerseits die Schubrißbreiten begrenzt werden und andererseits die Biegezugzone weit weniger aufreißt. Hierdurch besitzen sowohl der Steg als auch die Biegedruckzone eine höhere Steifigkeit, so daß im Vergleich zu entsprechenden Stahlbetonbalken der Betontraganteil größer ist.

Nach DIN 4227/1 wird der Einfluß der Vorspannung nur in Zone a berücksichtigt, in der auch im Bruchzustand der Zuggurt ungerissen bleibt. Hier darf bei der Bestimmung

der erforderlichen Schubbewehrung die Neigung der Druckstreben flacher angesetzt werden, während in Zone b die Schubbemessung unabhängig von der Höhe der Vorspannung erfolgt.

Um den Einfluß der Vorspannung auf das Schubtragverhalten zu verdeutlichen ist im Bild 6.5 der Beiwert f_v , der den Einfluß des Vorspanngrades wiedergeben soll, über dem Verhältniswert M_o/M_u aufgetragen. Diese Form der Darstellung setzt voraus, daß die Wirkung der Vorspannung auf das Schubtragverhalten über den Betontraganteil erfaßt wird.

Aus dem Bild 6.5 ist deutlich zu erkennen, daß der Betontraganteil mit dem Verhältnis M_o/M_u zunimmt. Der Zusammenhang zwischen Betontraganteil und Höhe der Vorspannung läßt sich für Spannbetonbalken durch den Ansatz

$$f_v = 1 + 1,25 \cdot M_o/M_u \quad (6.8)$$

beschreiben.

Im Vergleich zur CEB/FIP-Mustervorschrift wird mit dem hier vorgeschlagenen Ansatz für den Betontraganteil der Einfluß der Vorspannung höher bewertet, auch wenn die unterschiedlichen Sicherheitsbeiwerte für M_u in Gl. (6.8) und in der CEB/FIP-Mustervorschrift berücksichtigt werden müssen. Nach der CEB/FIP-Mustervorschrift, die mit Teilsicherheitsbeiwerten arbeitet, beträgt $M_u = 1,35 \cdot M_g + 1,5 \cdot M_p$ in Gl.(6.8) wurde $M_u = 1,75 \cdot (M_g + M_p)$ angesetzt. Eine höhere Bewertung der Vorspannung kommt auch dadurch zustande, daß hier im Gegensatz zur CEB/FIP der Einfluß der Vorspannung zusätzlich zu Gl. (6.8) noch durch die Erfassung der Spannbewehrung im Parameter f_L berücksichtigt wird.

Die noch unbekannte Größe $\Delta\tau$ in Gl. (6.4), die als Grundschubspannung des Betontraganteils bezeichnet wird, kann ebenfalls aus den experimentellen Daten bestimmt werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergibt sowohl für

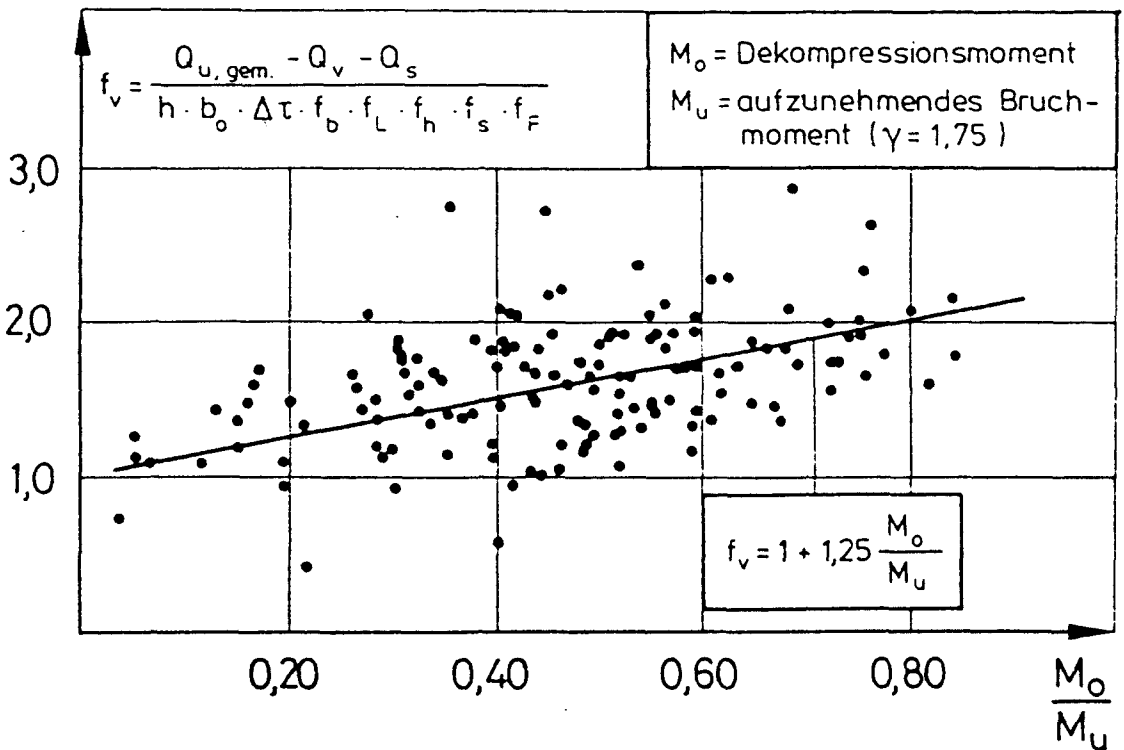


Bild 6.5: Einfluß der Vorspannung auf den Betontraganteil bei Spannbetonbalken

Stahlbeton- als auch Spannbetonbalken als Mittelwert $\Delta\tau = 0,24 \text{ N/mm}^2$. Die 5 % Fraktile, die für die spätere Entwicklung eines Bemessungsansatzes von Bedeutung ist, beträgt $\Delta\tau = 0,19 \text{ N/mm}^2$.

Setzt man die gefundenen Einflußgrößen in Gl. (6.4) ein, so ergibt sich ein Betontraganteil

$$Q_b = h \cdot b_o \cdot 0,19 \sqrt{b_{WN}} \sqrt[3]{\mu_L} \cdot f_F (1 + 1,25 \cdot M_o/M_u) \quad (6.9)$$

M_u = im Bemessungsschnitt aufzunehmendes Bruchmoment, $\gamma = 1,75$.

Die Schubtragfähigkeit wird bei sehr hohen Schubbewehrungsgraden durch die Druckfestigkeit des Betons begrenzt. Die Betonspannungen der Druckstreben sind von der Neigung der Druckstreben und der Schubbewehrung abhängig. Setzt

man entsprechend der klassischen Fachwerkanalogie unter 45° geneigte Druckstreben an, so lassen sich zwischen Druckstrebenspannung und dem Rechenwert der Schubspannung τ_0 folgende Beziehungen herstellen:

Für lotrechte Schubbewehrung

$$\sigma_2^{II} = 2 \cdot Q / (0,9 \cdot h \cdot b_0) = 2 \tau_0 \quad (6.10)$$

und für 45° geneigte Schubbewehrung

$$\sigma_2^{II} = Q / (0,9 \cdot h \cdot b_0) = \tau_0 \quad (6.11)$$

Aufgrund dieser Beziehungen kann die Druckstrebentragfähigkeit durch Festlegung einer oberen Schubspannungsgrenze, die von der Betonfestigkeit abhängt, bestimmt werden. Diese Form des Nachweises der Druckstrebentragfähigkeit ist heute in den meisten Bemessungsvorschriften üblich. Bei der Berechnung der Druckstrebentragfähigkeit muß jedoch eine gegenüber der Biegebemessung verminderte Betondruckfestigkeit in Rechnung gestellt werden. Diese Verminderung der Druckfestigkeit ist einerseits auf die unregelmäßige Begrenzung der Druckstreben durch die Schubrisse und andererseits auf die durch die Schubbewehrung eingeleitete Querkzugbeanspruchung der Druckstreben zurückzuführen.

Um die Abhängigkeit der oberen Schubspannungsgrenze von der Betonfestigkeit zu untersuchen, sind in Bild 6.6 die im Versuch ermittelten Bruchschubspannungen von 26 Spannbeton- und 47 Stahlbetonbalken, die durch Druckstrebenbruch versagten, in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit aufgetragen. Alle Versuchsbalken besaßen als Schubbewehrung lotrechte Bügel. Nach Bild 6.6 ist zwischen der Bruchschubspannung und der Würfeldruckfestigkeit ein annähernd linearer Zusammenhang festzustellen. Im Mittel wurde von den Versuchsbalken eine Bruchschubspannung von $0,32 B_{ws}$ erreicht. Die 5 % Fraktile beträgt $\tau_u = 0,26 B_{ws}$.

Für die Entwicklung eines Bemessungsansatzes ist diese Bruchschubspannung noch um das Verhältnis Dauerstandsfestigkeit zu Kurzzeitfestigkeit abzumindern. Da auf die hier ausgewerteten Versuchsbalken in der Regel mindestens 1 Stunde lang Lasten nahe der Bruchlast eingewirkt haben, erscheint es angemessen, einen Festigkeitsverlust von 10 % für Dauerstandsbelastungen anzunehmen. Im Vergleich hierzu wird in DIN 1045 bei der Biegebemessung die im Kurzzeitversuch an Probewürfeln gemessene Druckfestigkeit um den Faktor 0,8 reduziert, da hier die Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 N/mm² pro Sekunde erheblich größer als bei den Versuchsbalken ist.

Für Balken mit lotrechter Schubbewehrung kann somit zur Bemessung als obere Schubspannungsgrenze folgende Beziehung angegeben werden:

$$\tau_u = 0,23 \cdot \beta_{ws} \quad (6.12)$$

Da zu einer vergleichbaren Auswertung von Balken mit geneigter Schubbewehrung nicht genügend Versuchsdaten vorliegen, wird für geneigte Bügel in Anlehnung an die CEB/FIP-Mustervorschrift vorgeschlagen, die Schubspannung auf

$$\tau_u = 0,23 \cdot \beta_{ws} (1 + \cot \alpha) \leq 0,38 \cdot \beta_{ws} \quad (6.13)$$

zu begrenzen. Damit ergibt sich die maximal aufnehmbare Querkraft für die Bruchart "Versagen der Betondruckstreben" in Abhängigkeit von der Neigung der Schubbewehrung zu

$$\begin{aligned} Q_D &= 0,9 \cdot b_0 \cdot h \cdot 0,23 \cdot \beta_{ws} (1 + \cot \alpha) \\ &\leq 0,38 \cdot \beta_{ws} \cdot b_0 \cdot h \cdot 0,9 \end{aligned} \quad (6.14)$$

Mit den aufgrund der Parameterstudien entwickelten Ansätzen Gl. (6.1), (6.2), (6.3), (6.9) und (6.14) ist es nun möglich, die Traglasten sowohl für den Schubzugbruch, als auch den Druckstrebenbruch von Spannbetonbalken mit nachträglicher Vorspannung zu ermitteln.

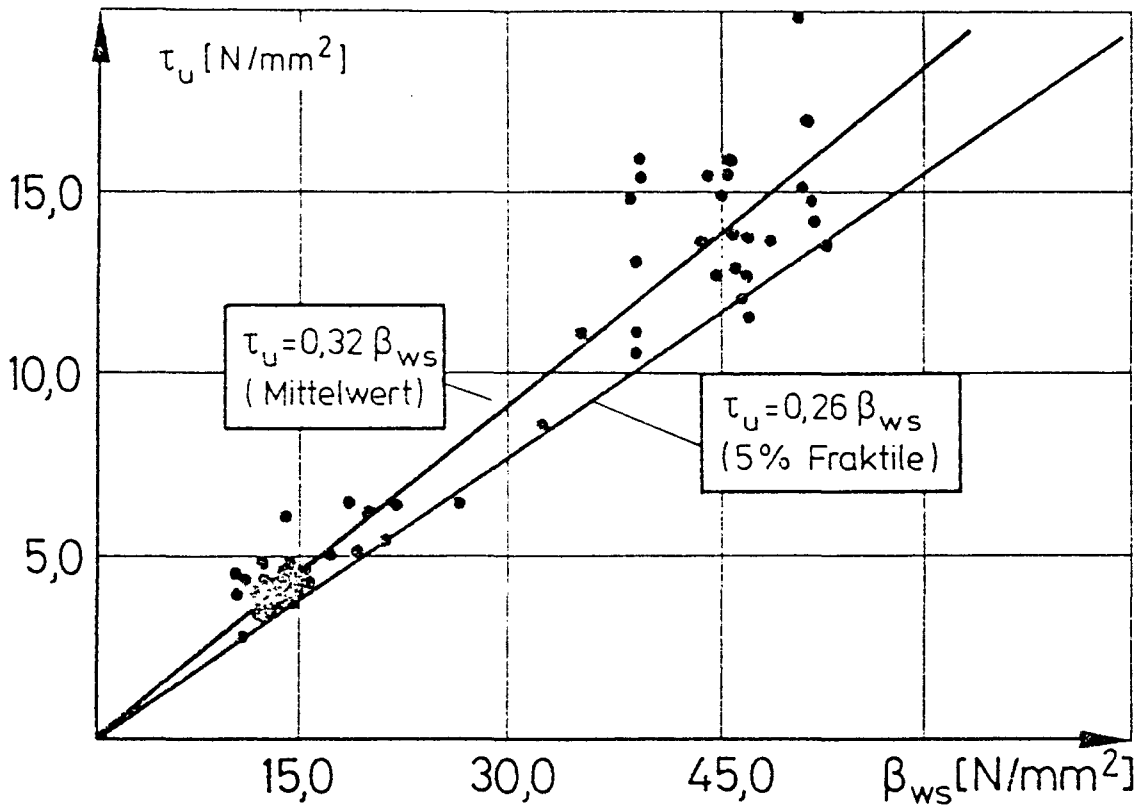


Bild 6.6: Bruchschubspannung in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit

Nach einer Überprüfung dieser Ansätze an den eigenen und fremder Versuche soll anschließend auch die Anwendung bei Balken mit Vorspannung ohne Verbund überprüft werden.

6.3 Überprüfung des Schubbemessungsvorschlages für Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund an Versuchsergebnissen

Die Bemessung der Schubbewehrung erfolgt wie die Biegebemessung im Bruchzustand, d.h. unter 1,75facher Gebrauchslast. In den vorangegangenen Kapiteln sind aufgrund von Parameteruntersuchungen Bemessungsansätze entwickelt worden, die nachfolgend wegen der besseren Übersichtlichkeit nochmals zusammengefaßt werden.

$$Q_u = Q_s + Q_b + Q_v \leq Q_D$$

Querkraftanteil der Schubbewehrung:

$$Q_s = \mu_{s,s} \cdot B_{s,s} \cdot b_0 \cdot 0,9 \cdot h \cdot \sin \alpha (1 + \cot \alpha)$$

Betontraganteil:

$$Q_b = h \cdot b_0 \cdot 0,19 \cdot \sqrt[2]{B_{WN}} \cdot \sqrt[3]{\mu_L} \cdot f_F (1 + 1,25 \cdot M_0/M_u)$$

mit $\mu_L = (A_s + A_v)/(b_0 \cdot h)$ (μ_L in %)

$$f_F = 0,7 + 0,15 \cdot b/b_0 \leq 1,0 \quad (6.15)$$

$$M_0 = N_{v,\phi} \cdot I_b / y_u (1/A_b + y_{bv} \cdot y_u / I_b)$$

(Dekompressionsmoment)

M_u = im Bemessungsschnitt aufzunehmendes Bruchmoment,
 $\gamma = 1,75$

Vertikalkomponente der Spanngliedkraft

$$Q_s = N_v \cdot \sin \alpha$$

Druckstrebeentragkraft

$$Q_D = 0,9 h \cdot b_0 \cdot 0,23 \cdot B_{WN} (1 + \cot \alpha) \\ \leq 0,9 \cdot h \cdot b_0 \cdot 0,38 \cdot B_{WN}$$

In Bild 6.7 wird die bei den eigenen Versuchen ermittelte Traglast mit der durch den Rechenansatz vorhergesagten verglichen. Es muß dabei beachtet werden, daß dem Bemessungsansatz die Sicherheit bezogen auf die 5 % Fraktile zugrundegelegt ist. Das im Bild angegebene Verhältnis $Q_{u, \text{test}}/Q_{u, \text{theor.}}$ liegt im Mittel bei 1,167 und ist wesentlich besser als dasjenige der vorher behandelten Bemessungsvorschriften (siehe Bild 6.2). Der Bemessungssatz sagt bei allen Versuchsbalken ein Versagen der Schubbewehrung voraus, wie dies auch bei den Versuchen beobachtet wurde und den Prinzipien der Vorschriften entspricht.

Versuchs - balken	$\mu_{s,s}$	$Q_{u, \text{test}}$	$Q_{u, s}$	Q_b	Q_0	Q_u	$\frac{Q_{u, \text{test}}}{Q_u}$
SB 1 / 1	0,330	350,0	102,0	227,6	766,6	329,6	1,062
SB 1 / 3	0,183	347,5	54,0	240,7	766,6	294,7	1,179
SB 2 / 1	0,565	445,0	175,0	208,6	710,4	383,6	1,160
SB 2 / 3	0,377	397,0	108,0	221,2	710,4	329,2	1,206
SB 3 / 1	0,500	450,0	155,0	277,3	773,7	432,3	1,041
SB 3 / 3	0,108	368,8	54,0	301,0	773,7	355,0	1,039
SB 4 / 1	0,785	627,0	248,0	253,2	822,9	501,2	1,251
SB 4 / 3	0,754	612,5	238,0	254,8	822,9	492,8	1,243
SB 5 / 1	0,667	475,0	176,0	237,8	745,5	413,8	1,148
SB 5 / 2	1,005	633,3	264,0	223,9	745,5	487,9	1,298
SB 5 / 3	0,628	495,0	173,0	238,1	745,5	411,1	1,204
SB 6 / 1	0,283	280,0	80,0	173,4	703,3	253,4	1,105
SB 6 / 2	0,377	385,3	106,0	169,4	703,3	275,4	1,392
SB 6 / 3	0,226	225,0	68,0	175,6	703,3	238,6	0,943
SB 7 / 1	0,523	450,0	144,0	247,6	731,5	391,6	1,149
SB 7 / 2	0,628	520,0	173,0	241,7	731,5	414,7	1,254
Mittelwert							1,167
Standardabweichung							0,109
Variationskoeffizient							0,093

Bild 6.7: Gegenüberstellung der experimentellen Bruchquerkräfte mit den rechnerischen Traglasten nach Gleichung (6.15)

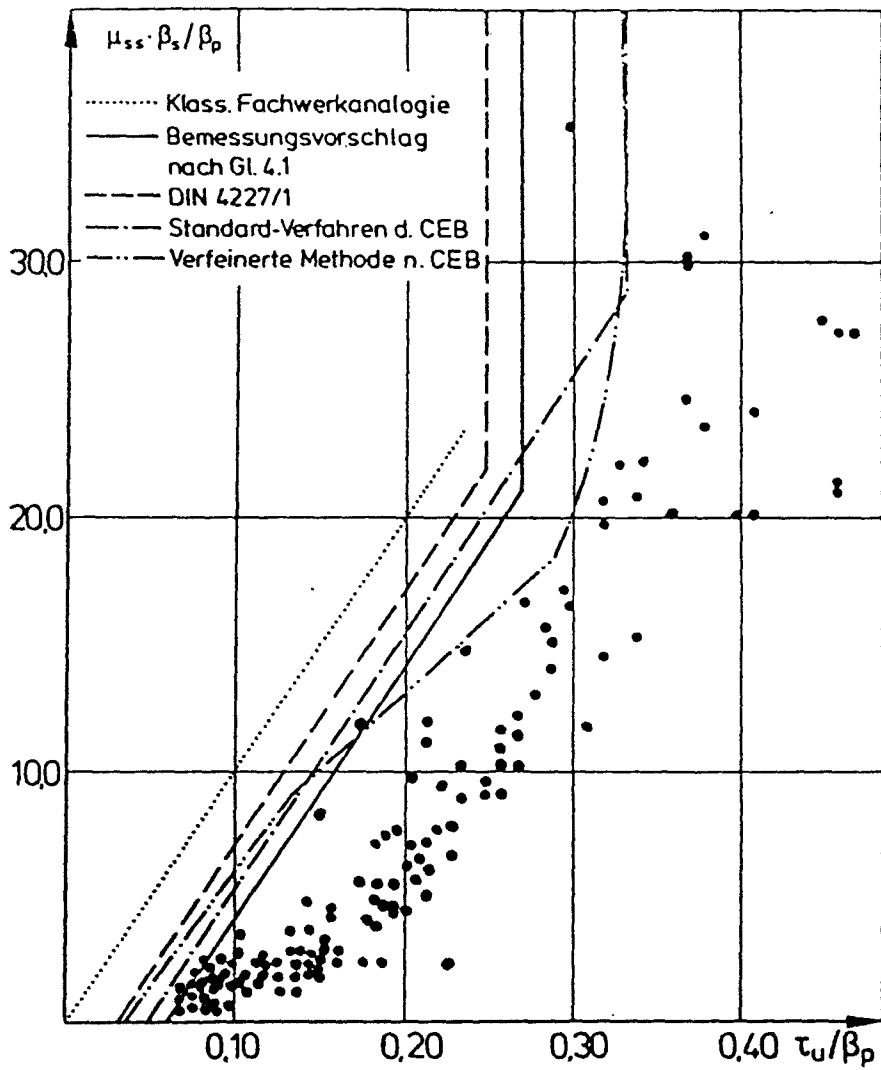


Bild 6.8: Erforderliche Schubbewehrung nach verschiedenen Vorschriften und nach Gleichung 6.15 im Vergleich mit Versuchsergebnissen

Um auch den Ansatz für die Bruchart Druckstrebenbruch zu überprüfen und den Unterschied zu den anderen Bemessungsvorschriften herauszustellen sind in Bild 6.8 die rechnerisch aufnehmbaren Schubspannungen mit den in den experimentellen Untersuchungen fremder Institute (siehe Anhang /18/) erzielten Bruchschubspannungen verglichen. Hierbei wird unterstellt, daß das Produkt der Teilsicherheitsbeiwerte der CEB/FIP-Mustervorschrift dem globalen Sicherheitsbeiwert $\gamma = 1,75$ der DIN 4227 Teil 1 entspricht.

Die in Bild 6.8 zum Teil deutlichen Unterschiede zwischen rechnerischen und gemessenen Bruchschubspannungen sind in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die eingezeichneten Kurvenverläufe für den Mittelwert, der in den Versuchen variierten Parameter berechnet sind.

Aus dem Bild 6.8 wird deutlich, daß vornehmlich das CEB/FIP-Standard-Verfahren sowie der Bemessungsvorschlag von Hegger (Gl. 6.15) die Einflußgrößen auf das Schubtragverhalten von Spannbetonbalken zutreffend erfassen. Vorteilhaft ist, daß ein kontinuierlicher Übergang bei der Schubbemessung vom Stahlbeton bis hin zur vollen Vorspannung erfolgt.

Um die Genauigkeit des CEB/FIP-Standard-Verfahrens weiter zu verbessern, wird vorgeschlagen, in Anlehnung an Gl. (6.15) folgende Änderungen vorzunehmen:

Zunächst ist die obere Schubspannungsgrenze entsprechend Gl. (6.15) auf $\tau_u = 0,24 \cdot \beta_p$ zu reduzieren. Der Wert $0,24 \cdot \beta_p$ ergibt sich aus Gl. (6.15) mit dem Umrechnungsfaktor 0,85 für das Verhältnis Prismen- zur Würfeldruckfestigkeit und einen Zusatzfaktor von 0,9 der berücksichtigt, daß der CEB-Ansatz die Bruchschubspannung im Gegensatz zu Gl. (6.15) auf die gesamte Stegfläche $A_{\text{Steg}} = b_o \cdot h$ bezieht ($\tau_u = 0,24 \cdot \beta_p = 0,9 \cdot 0,23 \cdot \beta_{WN}/0,85$). Weiterhin sollte bei dem CEB-Standard-Verfahren der Faktor zur Berücksichtigung des Vorspanngrades $(1 + M_o/M_u)$ er-

hört werden und zusätzlich im Betontraganteil die Längsbewehrung einschließlich der Spannstahlbewehrung berücksichtigt werden.

6.4 Schubtragverhalten von Betonbalken mit Vorspannung ohne Verbund

Während das Biegebruchverhalten bei Vorspannung ohne Verbund schon Thema zahlreicher Untersuchungen war, liegen zum Schubtragverhalten bisher nur wenige Untersuchungen vor /19/, 20/. Der Ursache dieser geringen Forschungstätigkeit liegt darin begründet, daß die Vorspannung ohne Verbund in der Vergangenheit vorwiegend bei punktgestützten Flachdecken eingesetzt wurde.

Daher existieren auf dem Gebiet des Schubtragverhaltens lediglich zum Durchstanzen grundlegende Untersuchungen /21/, /22/.

Die bisherigen theoretischen Überlegungen /19/ und /23/ zum Schubtragverhalten von Bauteilen mit Vorspannung ohne Verbund gehen davon aus, daß sich der Tragmechanismus von demjenigen der Bauteile mit Verbund unterscheidet. Dabei wurden folgende Überlegungen angestellt:

Solange die Biegezugzone im rechnerischen Bruchzustand ungerissen bleibt, kann die Querkraftabtragung mit einem Fachwerkmodell beschrieben werden, da der überdrückte Zuggurt in der Lage ist, die nach der Fachwerkanalogie auftretenden Versatzkräfte aufzunehmen. Ist die Zugzone gerissen, bildet sich ein Bogen-Zugbandmodell aus, bei dem die Bruchlast aus der Tragfähigkeit des Druckbogens ermittelt wird.

Wenn in der gerissenen Zugzone neben den Spanngliedern ohne Verbund zusätzlich Betonlängsbewehrung vorhanden ist, findet eine Überlagerung der Fachwerk- und der Bogen-Zugbandtragwirkung statt. Der dem Fachwerk zuzuweisende Querkraftanteil, für den Bügel zu bemessen sind, kann aus dem

Verhältnis der Momententragfähigkeit von Betonstahlbewehrung zur verbundlosen Spannbewehrung errechnet werden. Gleichzeitig sind die Hauptdruckspannungen aus den Fachwerkstreben und Bogenspannungen zu bilden und nachzuweisen.

In der gültigen Fassung von DIN 4227 Teil 6 /23/ ist die Frage der Schubbemessung bei Vorspannung ohne Verbund, insbesondere die Wahl des Tragmodells, nur unbefriedigend geregelt. Die Schubbemessung kann dort sowohl nach der Fachwerkanalogie als auch nach dem Bogen-Zugbandmodell durchgeführt werden, obwohl die rechnerischen Traglasten beider Modelle stark unterschiedlich sein können. So ergibt sich beim Bogen-Zugbandmodell die Schubtragfähigkeit allein aus der Tragfähigkeit des Druckbogens bzw. Zugbandes, während eine vorhandene Bügelbewehrung keinen Einfluß auf die Tragfähigkeit besitzt.

Aus der maximalen Hauptdruckspannung des Druckbogens von $0,6 \beta_{WS}$ ergibt sich zusammen mit der Querschnittsfläche und der Neigung des Druckbogens eine Schubtragfähigkeit von

$$Q_u = 0,6 \cdot \beta_{WS} \cdot b_D \cdot h_D \cdot \tan \delta_D \quad (6.16)$$

Die durchgeführten Versuche /20/ zeigen jedoch, daß eine Bogen-Zugbandtragwirkung durch die gemessenen Bügeldehnungen und Betonstauchungen nicht bestätigt werden. Die Versuchsergebnisse lassen eher auf eine Fachwerktragwirkung schließen.

Diese Fachwerktragwirkung, auch bei den mit einer Einzelast in Feldmitte belasteten Einfeldbalken mit geringen Mengen Betonstahllängsbewehrung, läßt sich durch die Tatsache erklären, daß sich hier infolge des fehlenden Verbundes der Spannglieder nur ein Riß in Feldmitte bildet. Entgegen den Vorstellungen von Jungwirth/Wölfel /19/, /23/ bildet sich hier nicht ein reiner Druckbogen aus, vielmehr werden die Querkräfte über ein den Stegabmessungen ent-

sprechendes Druckfeld zum Auflager geleitet. Dieses Druckfeld ist in Verbindung mit der in ihm enthaltenen Bügelbewehrung in der Lage, ähnlich einem Fachwerk nennenswerte Teile der Querkraft zu übertragen. Bei einer Steigerung der schlaffen Längsbewehrung nimmt zwar die Länge der gerissenen Zugzone zu, aber gleichzeitig können sich die Druckstreben auf diese Bewehrung abstützen.

Weiterhin zeigen die Versuche, daß ähnlich wie bei der Vorspannung mit Verbund, durch eine Erhöhung der Bügelbewehrung auch eine Schubtragfähigkeitserhöhung erreicht wird.

Bei starker Verbügelung zeigt jedoch der direkte Vergleich eine Traglastminderung der Balken mit Vorspannung ohne Verbund gegenüber demjenigen mit Verbund in der Größenordnung von 10 %, die vermutlich auf die geringere Steifigkeit des Zuggurtes zurückzuführen ist.

Um zu überprüfen, wie stark die Druckstrebentragfähigkeit durch den fehlenden Verbund der Längsbewehrung vermindert wird, sind in Bild 6.9 die Bruchschubspannungen von Balken mit Druckstrebenversagen in Abhängigkeit der Betonfestigkeit aufgetragen. Daraus ist zu erkennen, daß die Bruchschubspannungen der untersuchten Balken mit Vorspannung ohne Verbund am unteren Rand des Streubereiches für vergleichbare Balken mit im Verbund liegender Längsbewehrung liegen. Es wird deshalb vorgeschlagen, als Bemessungsgleichung eine obere Schubspannungsgrenze

$$\tau_u = 0,21 \cdot \sigma_{WS} \quad (6.17)$$

anzugeben. Dieser Grenzwert ist um rund 10 % niedriger als derjenige für Vorspannung mit Verbund.

Da für Brucharten, die durch Versagen der Bügelbewehrung ausgelöst werden, die Verbundart der Spannglieder nur einen vernachlässigbaren geringen Einfluß auf die Schubtragfähigkeit zu besitzen scheint, kann der gleiche Bemes-

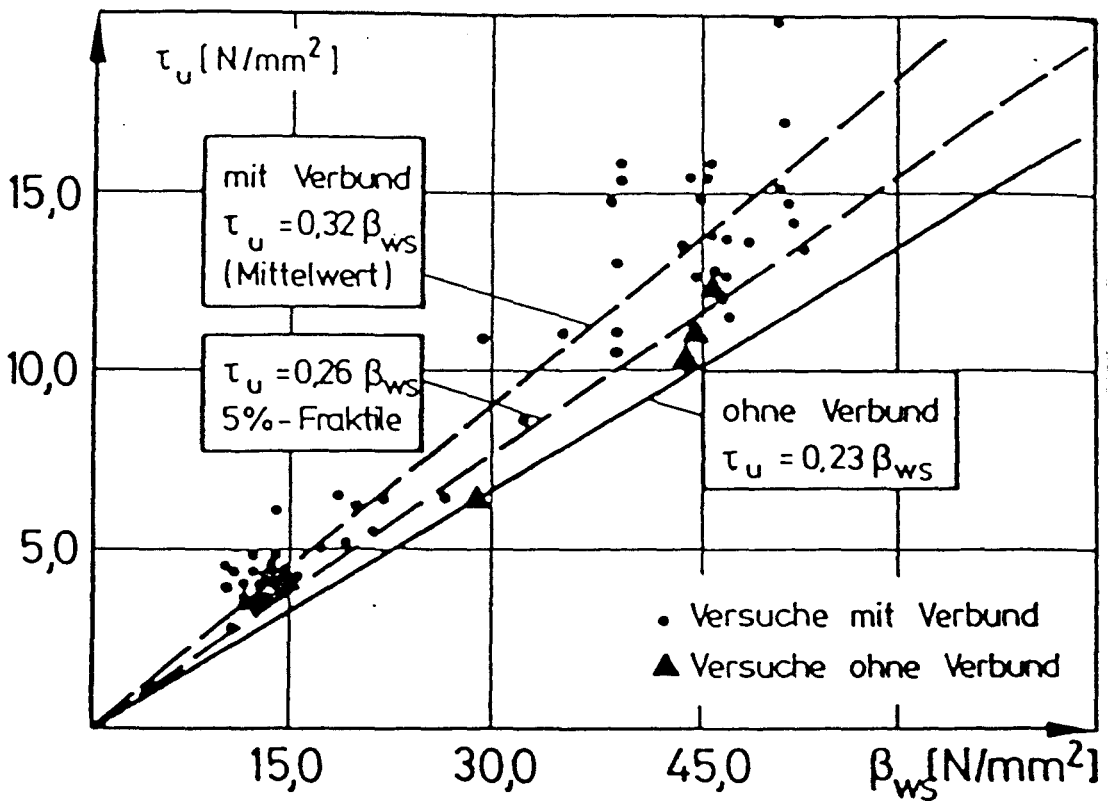


Bild 6.9: Bruchschubspannungen in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit β_{ws} für Vorspannung mit und ohne Verbund

sungsansatz wie bei Vorspannung mit Verbund unverändert verwendet werden. Die Schubtraglast setzt sich aus dem Anteil der Schubbewehrung, dem Betontraganteil und der Vertikalkomponente der Spannglieder zusammen. Da der Zuggurt aufgrund des für die Vorspannung ohne Verbund typischen Biege-rißverhaltens weitgehend frei von Biegerissen bleibt, kann die Quertragfähigkeit wie bei der Vorspannung mit Verbund mit Hilfe der Fachwerkanalogie bestimmt werden. Ist als Längsbewehrung neben verbundloser Spannglieder Betonstahllängsbewehrung vorhanden, nimmt zwar die Länge der gerissenen Zugzone zu, aber gleichzeitig ist diese Bewehrung in der Lage, die aus Fachwerkwirkung auftretenden Versatzkräfte aufzunehmen. Für die Bruchart Versagen der Betondruckstreben ergibt sich die maximal aufnehmbare Querkraft aus der oberen Schubspannungsgrenze

nach Gl. (6.17). Analog zu Gl. (6.15) können somit zur Schubbemessung bei Vorspannung ohne Verbund folgende Gleichungen angegeben werden. Für die zu bestimmende Bruchquerkraft

$$Q_u = Q_s + Q_b + Q_v \leq Q_D$$

betragen die einzelnen Anteile

Querkraftanteil der Schubbewehrung:

$$Q_s = \mu_{s,s} \cdot \beta_{ss} \cdot b_o \cdot 0,9 \cdot \sin \alpha (1 + \cot \alpha)$$

Betontraganteil:

$$Q_b = h \cdot b_o \cdot 0,19 \cdot \sqrt[2]{\beta_{WN}} \cdot \sqrt[3]{\mu_L} \cdot f_F \cdot (1 + 1,25 \cdot M_o / M_u)$$

mit:

$$\begin{aligned} \mu_L &= (A_s + A_v) / (b_o \cdot h) & (\mu_L \text{ in } \%) \\ f_F &= 0,7 + 0,15 \cdot b/b_o \leq 1,0 \\ M_o &= N_{v,\phi} \cdot I_b / y_u (1/A_b + y_{bv} \cdot y_u / I_b) & (6.18) \\ & \quad \text{(Dekompressionsmoment)} \end{aligned}$$

M_u = im Bemessungsschnitt aufzunehmendes Bruchmoment,
 $\gamma = 1,75$.

Vertikalkomponente der Spanngliedkraft:

$$Q_v = N_v \cdot \sin \alpha$$

Druckstrebentragfähigkeit

$$\begin{aligned} Q_D &= 0,9 h \cdot b_o \cdot 0,21 \beta_{WN} (1 + \cot \alpha) \\ &\leq 0,9 \cdot h \cdot b_o \cdot 0,34 \beta_{WN} \end{aligned}$$

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Schubtragverhalten von Spannbetonbalken untersucht. Ziel der Untersuchung war einerseits die Frage, wie die Höhe der Vorspannung die Schubtragfähigkeit beeinflusst und wie sich andererseits die Verbundart der Spannglieder - Vorspannung mit und ohne Verbund - auf die Schubtraglast auswirkt.

Zum Schubtragverhalten bei Vorspannung mit Verbund wurden zunächst die eigenen Versuche an 7 Balken mit I- und T-Querschnitt beschrieben. Die Auswertung der Versuchsergebnisse sowie der Vergleich der im Versuch erreichten Bruchlasten mit verschiedenen Bemessungsverfahren zeigt, daß das CEB/FIP-Standardverfahren am besten in der Lage ist die Schubbruchlast vorauszusagen. Der Vergleich zeigt jedoch auch, daß dieses Verfahren einige Einflußparameter nicht genügend genau erfaßt. Eine Modifikation des CEB-Verfahrens wurde von Hegger /18/ vorgenommen. Sein auf der Grundlage einer systematischen Auswertung von 600 in der Literatur beschriebenen Versuchen beruhender Rechenansatz erfaßt den Einfluß der Vorspannung auf die Schubtraglast kontinuierlich für alle Vorspanngrade. Wie bei dem CEB/FIP-Standardverfahren setzt sich bei seinem Ansatz die rechnerische Schubtraglast für die Bruchart Schubzugversagen aus dem Fachwerkanteil der Schubbewehrung, dem Betontraganteil und der Vertialkomponente der Spanngliedkraft zusammen. Der Querkraftanteil der Schubbewehrung wird mit Hilfe eines Fachwerkmodells, dessen Druckstrebenneigung 45° beträgt, bestimmt. Die von einem 45° -Fachwerk abweichende Tragfähigkeit der Schubbewehrung und die Querkraftanteile infolge der Rißverzahnung, der geneigten Biegedruckzone und aus Dübelwirkung der Längsbewehrung werden zu einem Betontraganteil zusammengefaßt. Der Querkraftanteil geneigter Spannglieder kann direkt aus der Vertikal-komponente der Spanngliedkraft ermittelt werden. Zur Abschätzung der Bruchart Druckstrebenversagen wurde eine obere Schubspannungsgrenze definiert, die linear von der Betonfestigkeit abhängt.

Dieses modifizierte CEB/FIP-Standardverfahren wurde anhand der Versuchsergebnisse überprüft und zeigte eine gute Übereinstimmung der experimentellen und theoretischen Traglasten.

Zum Schubtragverhalten bei Vorspannung ohne Verbund liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, daß auch bei dieser Vorspannart die Schubtragfähigkeit am besten mit Hilfe einer Fachwerk-analogie bestimmt werden kann. Je nach Schubbewehrungs-grad kann man auch hier zwischen den Brucharten Versagen der Schubbewehrung und Betondruckstrebenbruch unterscheiden. Für die Bruchart Versagen der Schubbewehrung kann der gleiche Bemessungsansatz wie bei Vorspannung mit Verbund verwendet werden, da der Zuggurt in den Schubzonen ungerissen bleibt und der fehlende Verbund somit keinen Einfluß auf das Tragverhalten ausüben kann. Das Versagen der Betondruckstreben wird durch eine obere Schubspannungsgrenze abgeschätzt, die jedoch aufgrund der flacheren Druckstrebenneigung im Vergleich zu Bauteilen mit im Verbund liegender Längsbewehrung abgemindert wurde. Da anhand der wenigen ausgeführten Balkenversuche nur erste, grundsätzliche Fragen geklärt werden konnten, sind zur experimentellen Absicherung des entwickelten Schubbemessungsvorschlags für Balken mit Vorspannung ohne Verbund unbedingt weitere Versuche erforderlich.

8 Literatur

- / 1/ Leonhardt, F.; Walther, R.: Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. Heft 151 des DAfStb, 1962
- / 2/ Placas, A.; Reagan, P.E.: Shear Failure of Reinforced Concrete Beams. ACI Journal, Oktober 1971, S. 763 - 773

- / 3/ Krefeld, W.J.; Thurston, C.W.: Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams. ACI Journal S. 451 - 474, April 1966

- / 4/ Braestrup, M.W.; Nielsen, M.P.; Bach, F.; Jensen, B.C.: Shear Tests on Reinforced Concrete T-Beams. Technical University of Denmark, Structural Research Laboratory, Rapport Nr. R. 72, Kopenhagen 1976

- / 5/ Kordina, K.; Rafla, K.; Blume, F.; Iványi, G.; Systematische Auswertung von Schubversuchen an Stahlbetonbalken. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Juli 1977 (s.a. Heft 364 des DAfStb)

- / 6/ Moosecker, W.: Zur Bemessung der Schubbewehrung von Stahlbetonbalken mit möglichst gleichmäßiger Zuverlässigkeit. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1979, Heft 307

- / 7/ Mallée, R.: Zum Schubtragverhalten stabförmiger Stahlbetonelemente. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1981, Heft 323

- / 8/ Ritter, W.: Die Bauweise Hennebique. Schweizerische Bauzeitung, Februar 1899

- / 9/ Mörsch, E.: Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung. Verlag K. Wittner, Berlin 1908

- /10/ DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, Ausgabe 1978

- /11/ DIN 4227 Teil 1: Spannbeton, Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Ausgabe 1979

- /12/ Leonhardt, F.; Koch, R.; Rostásy, F.S.: Schubversuche an Spannbetonträgern. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1973, Heft 227

- /13/ Thürlimann, B.; Bachmann, H.; Krauss, R.; Caflisch, R.; Heimgartner, E.: Schubversuche an teilweise vorgespannten Balken. Institut für Baustatik der ETH Zürich, Berichte Nr. 6504-2; 6504-3; 6504-5; 6504-6

- /14/ CEB/FIP Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, Ausgabe 1978

- /15/ Kordina, K.; Teutsch, M.: Einfluß von Größe und Dauer praxisüblicher Schwellbeanspruchungen auf die Gebrauchsfähigkeit segmentärer und teilweise vorgespannter Betonbauteile. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, April 1985.

- /16/ Teutsch, M.; Weber, V.: Zum Schubtragverhalten von Spannbetonbauteilen in Segmentbauart. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 6, 1984, S. 402 - 411

- /17/ Thürlimann, B.; Caflisch, R.: Teilweise vorgespannter Beton. Vorträge Betontag 1969. DBV 1969, S. 142 - 168

- /18/ Hegger, J.: Einfluß der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit von Spannbetonbalken. Dissertation TU Braunschweig, 1985

- /19/ Wölfel, E.: Vorspannung ohne Verbund. - Besonderheit der Bemessung. Beton und Stahlbetonbau, S. 209 - 211, September 1981

- /20/ Kordina, K.; Hegger, J.; Teutsch, M.: Anwendung der Vorspannung ohne Verbund. Heft 355 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 1984

- /21/ Pralong, J.; Brandli, W.; Thürlimann, B.: Durchstanzversuche an Stahlbeton- und Spannbetonplatten, Bericht Nr. 7305-3 des Instituts für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, 1979

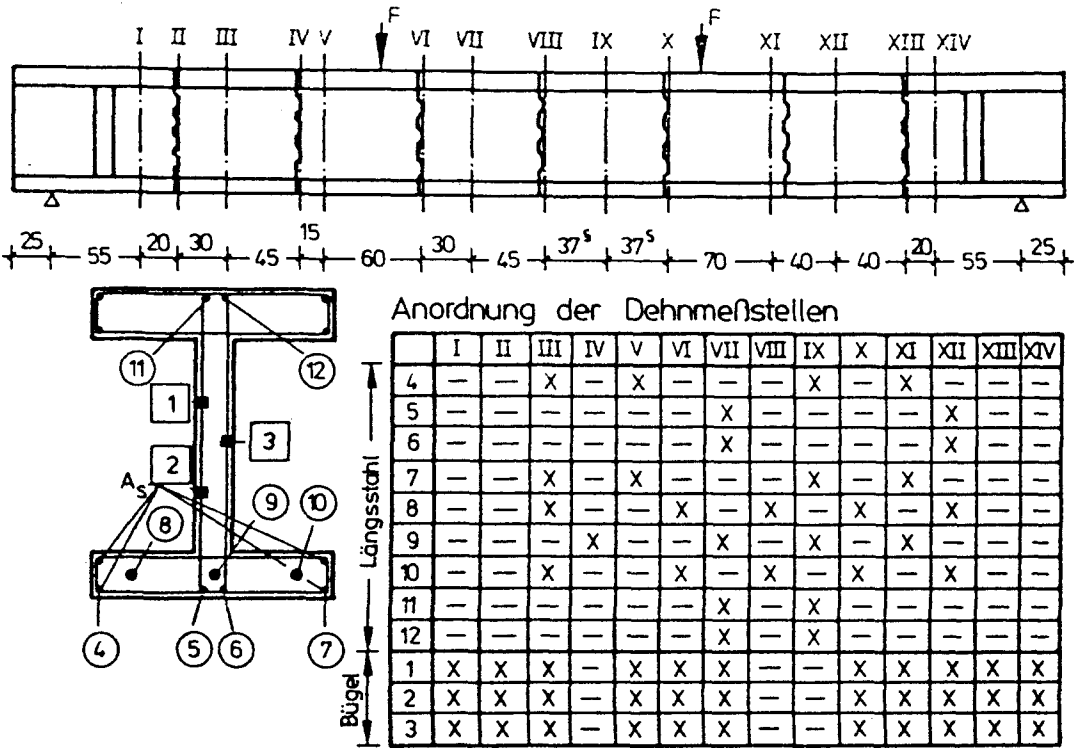
- /22/ Kordina, K.; Nölting, D.: Auswertung von Durchstanzversuchen an Platten mit Vorspannung ohne Verbund. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig

- /23/ Jungwirth, D.: Überlegungen zum Schubtragverhalten bei Vorspannung ohne Verbund. Arbeitspapier des U.A. DIN 4227 Teil 6, 1979

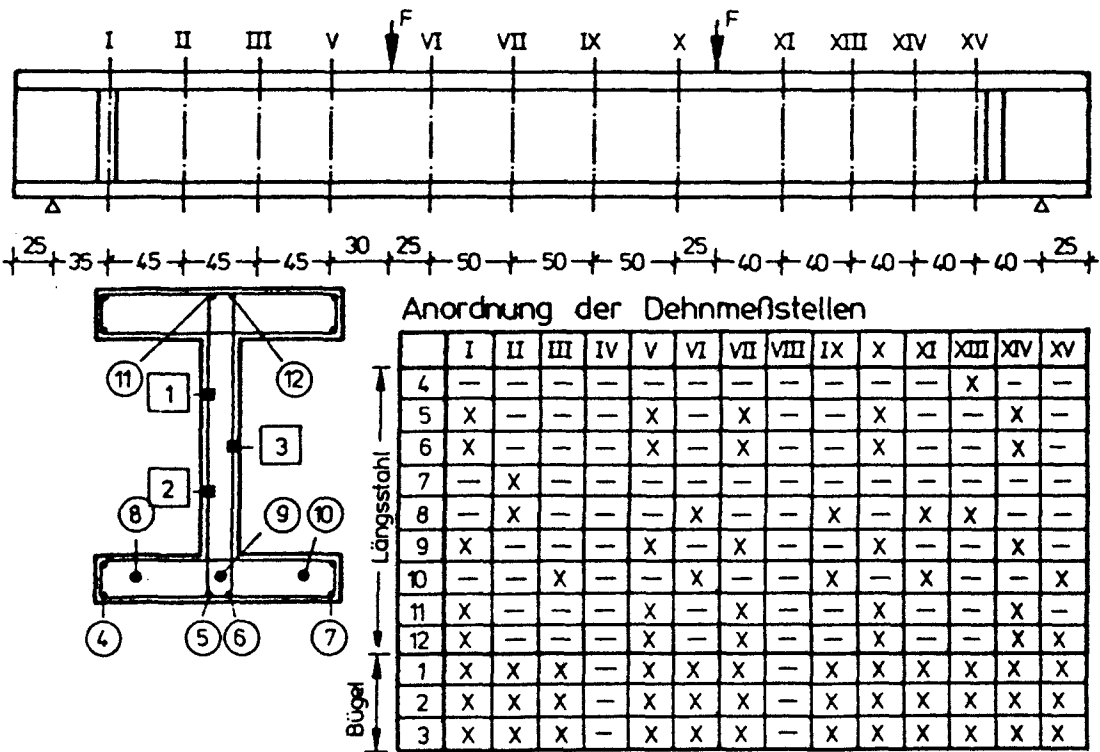
- /24/ DIN 4227 Teil 6: Spannbeton, Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund, Ausgabe Mai 1982

9 Anlagen

Versuchsbalken SB 1 - SB 4

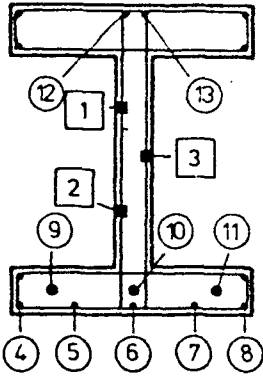
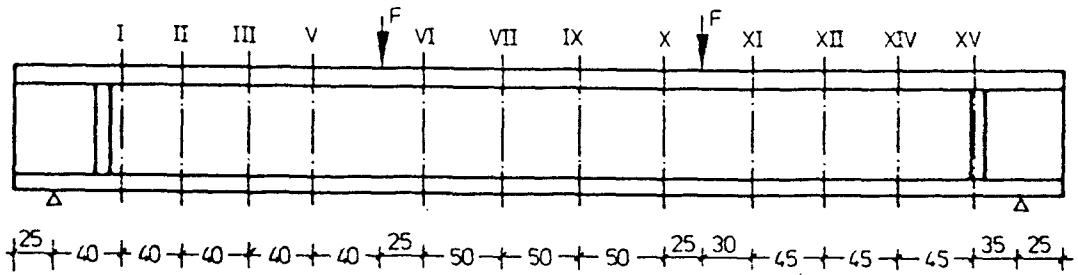


Versuchsbalken SB 5



Anlage A3.1: Anordnung der Dehnmeßstellen bei den Versuchsbalken SB1 - SB5

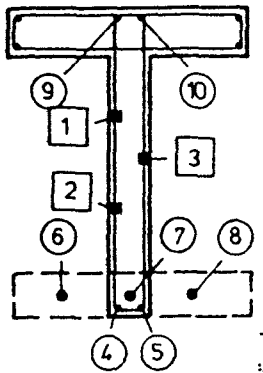
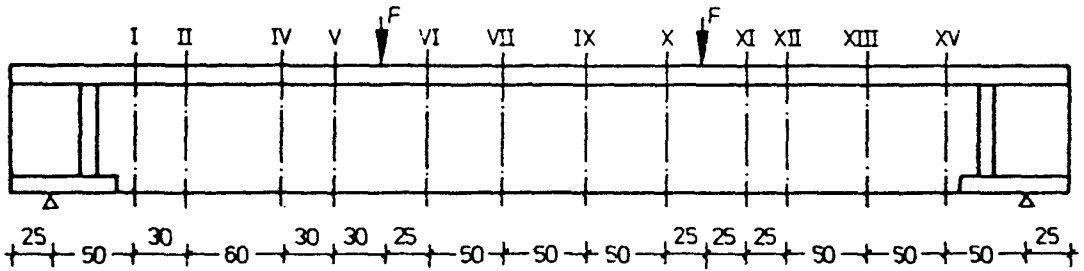
Versuchsbalken SB 6



Anordnung der Dehnmeßstellen

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIV	XV
Längsstahl	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—
5	X	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—	—	X	—
6	X	—	X	—	—	—	X	—	—	X	—	—	X	—
7	—	—	X	—	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—
8	—	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	X	—	—	—	X	—	—	X	—	X	X	—	—
10	X	—	—	—	X	—	—	—	X	—	—	—	X	—
11	—	—	X	—	—	X	X	—	X	—	X	—	—	X
12	X	—	X	—	—	—	X	—	—	X	—	—	X	—
13	X	—	X	—	—	—	—	—	—	X	—	—	X	—
Bügel	1	X	X	X	—	X	X	X	—	X	X	X	X	X
2	X	X	X	—	X	X	X	—	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	—	X	X	X	—	X	X	X	X	X	X

Versuchsbalken SB 7

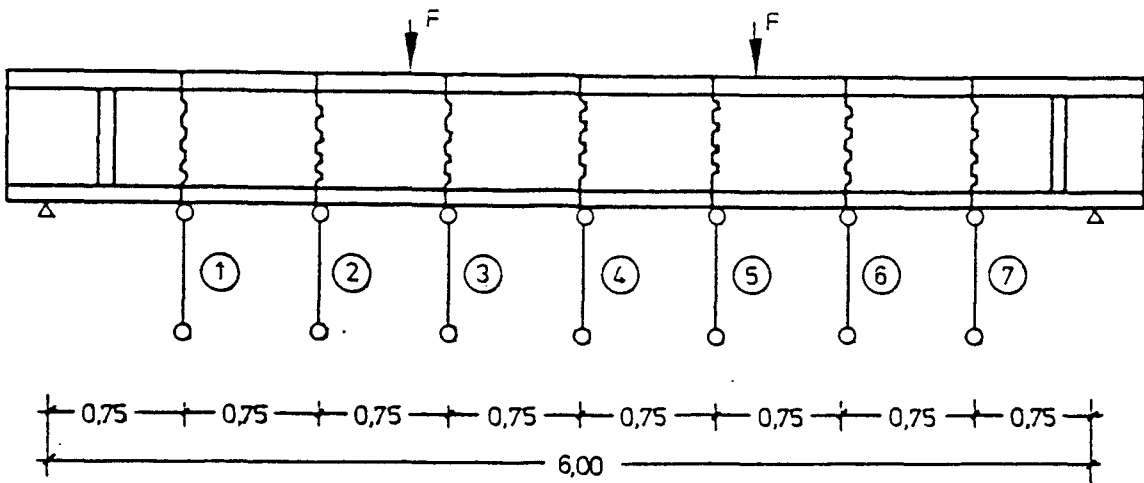


Anordnung der Dehnmeßstellen

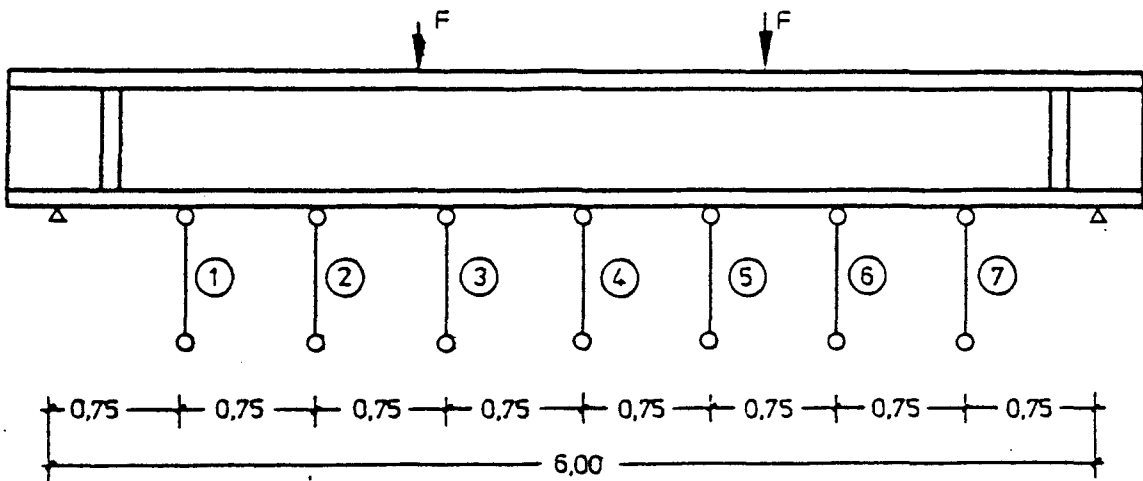
	I	II	IV	V	VI	VII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
Längsstahl	4	X	—	—	X	—	X	X	—	X	—	X	—
5	X	—	—	—	X	—	X	X	—	X	—	X	—
6	—	X	—	—	X	—	—	—	—	X	—	—	—
7	X	—	—	—	X	—	X	X	X	—	X	—	—
8	—	X	—	—	X	—	—	—	—	X	—	—	—
9	X	—	—	—	X	—	X	X	—	X	—	X	—
10	X	—	—	—	X	—	X	X	—	X	—	X	—
Bügel	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	—

Anlage A3.2: Anordnung der Dehnmeßstellen bei den Versuchsbalken SB6 - SB7

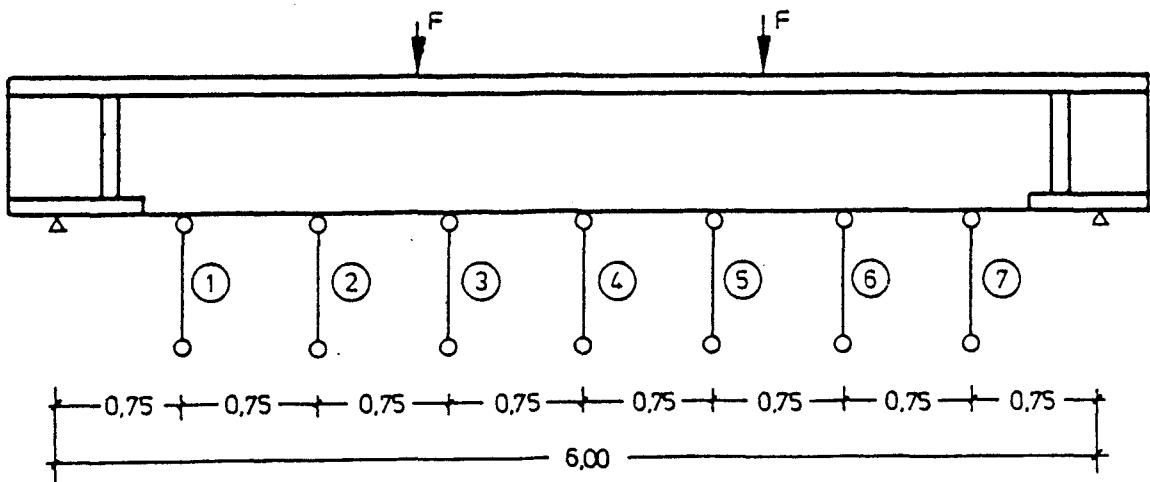
Versuchsbalken SB 1 - SB 4



Versuchsbalken SB 5 - SB 6

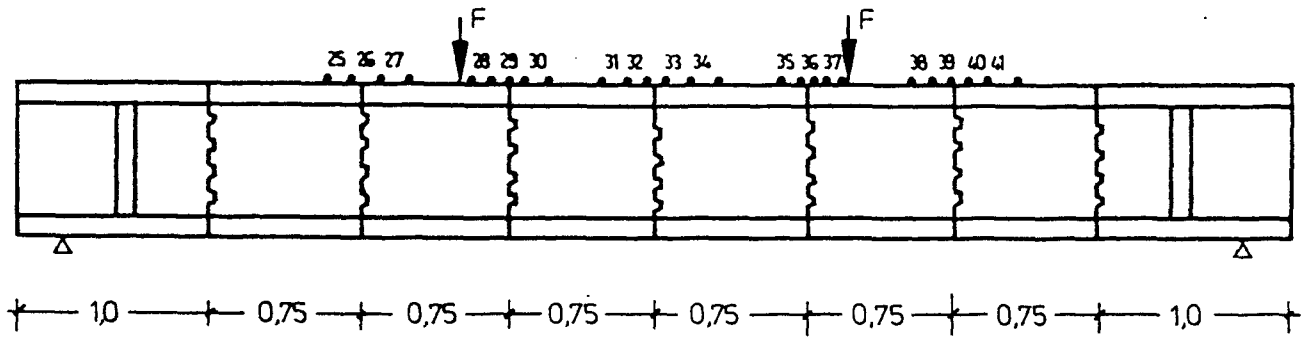


Versuchsbalken SB 7

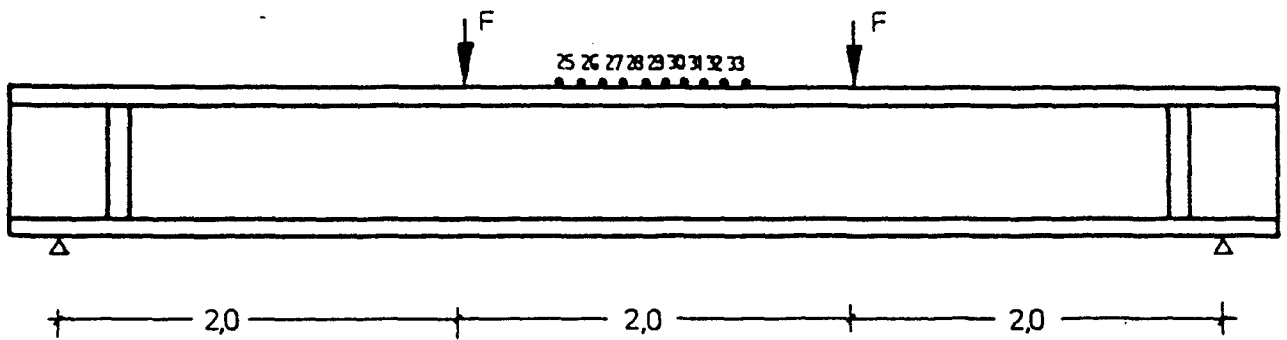


Anlage A3.3: Anordnung der Weggeber zur Durchbiegungsmessung

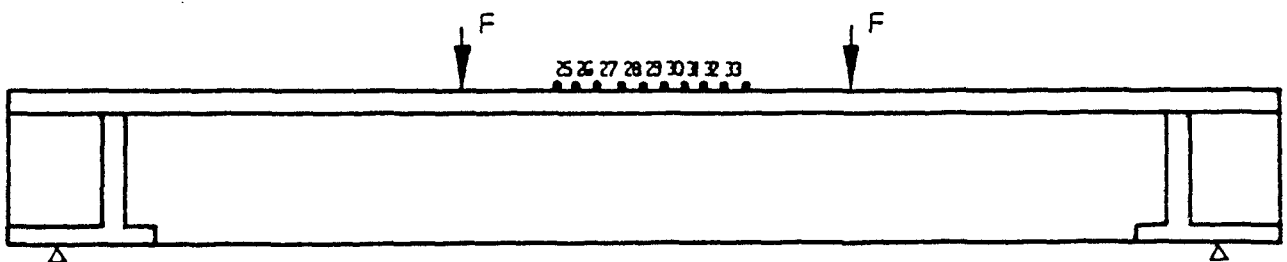
Versuchsbalken SB 1 - SB 4



Versuchsbalken SB 5 - SB 6

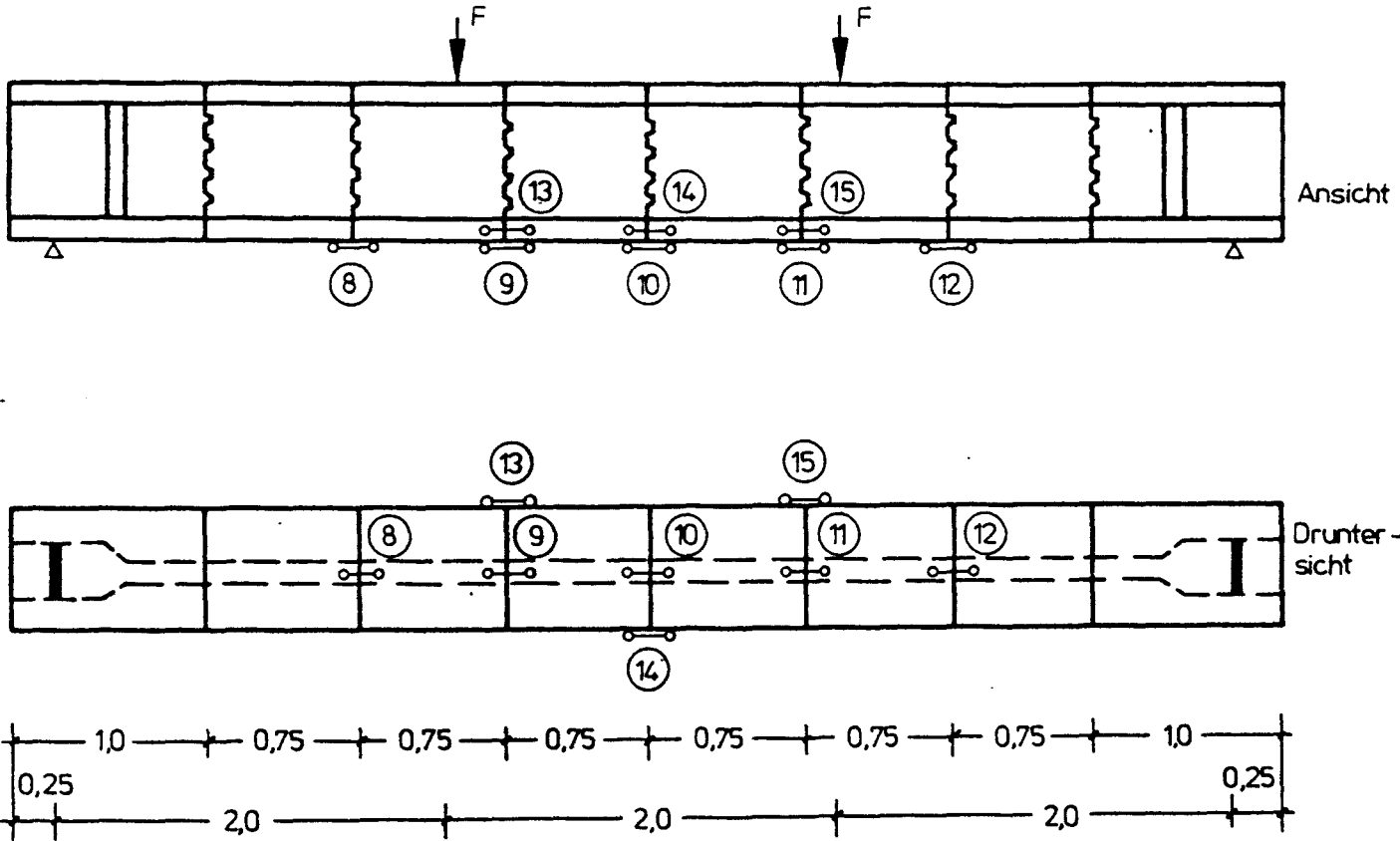


Versuchsbalken SB 7

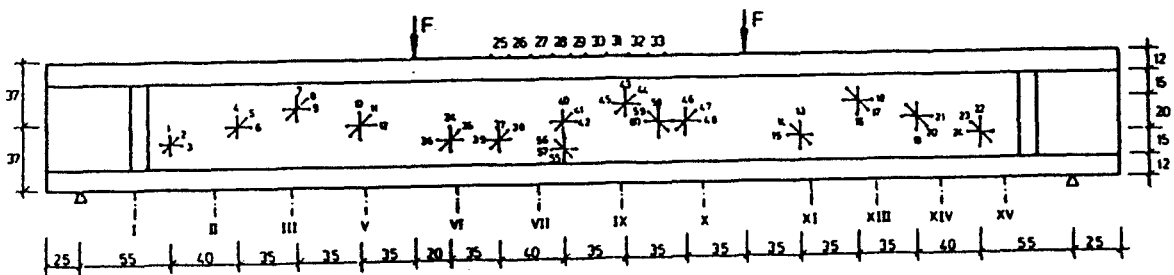


Anlage A3.4: Anordnung der Meßstellen zur Bestimmung der Betonverformungen

Versuchsbalken SB 1 - SB 4



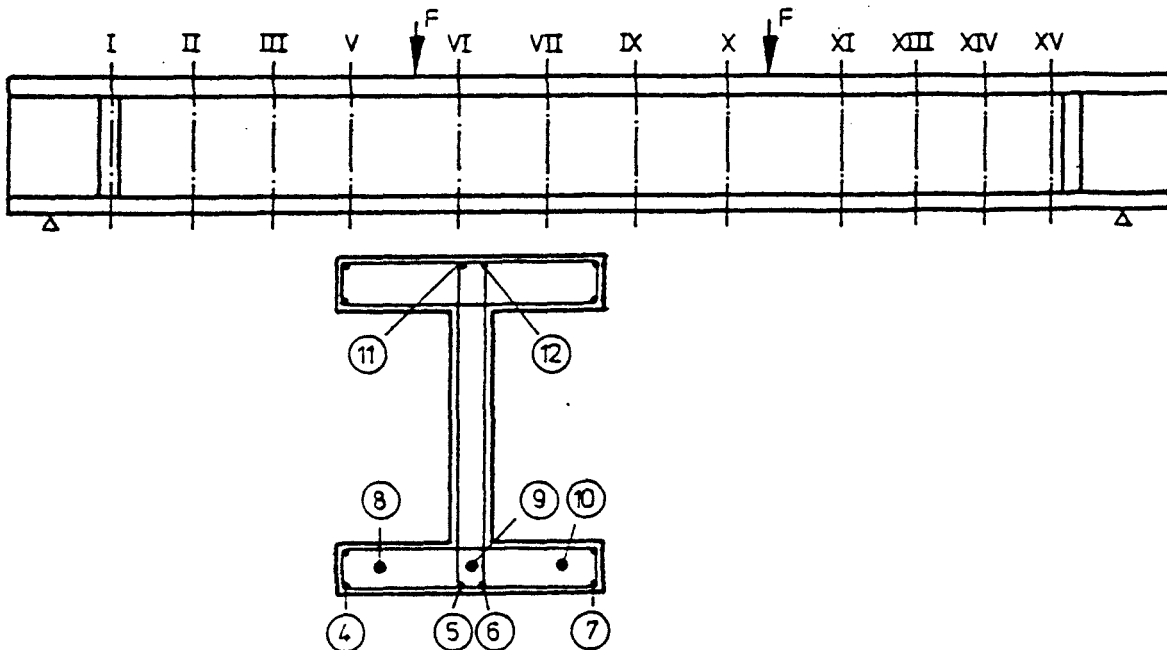
Versuchsbalken SB 5



Anlage A3.5: Anordnung der induktiven Weggeber zur Bestimmung der Fugenrißbreite bei den segmentären Versuchsbalken SB1 - SB4, sowie die Anordnung der Setzdehnungsmeßstellen zur Bestimmung der Betonverformungen im Stegbereich beim Versuchsbalken SB 5

Längsstahldehnungen in mm/m $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

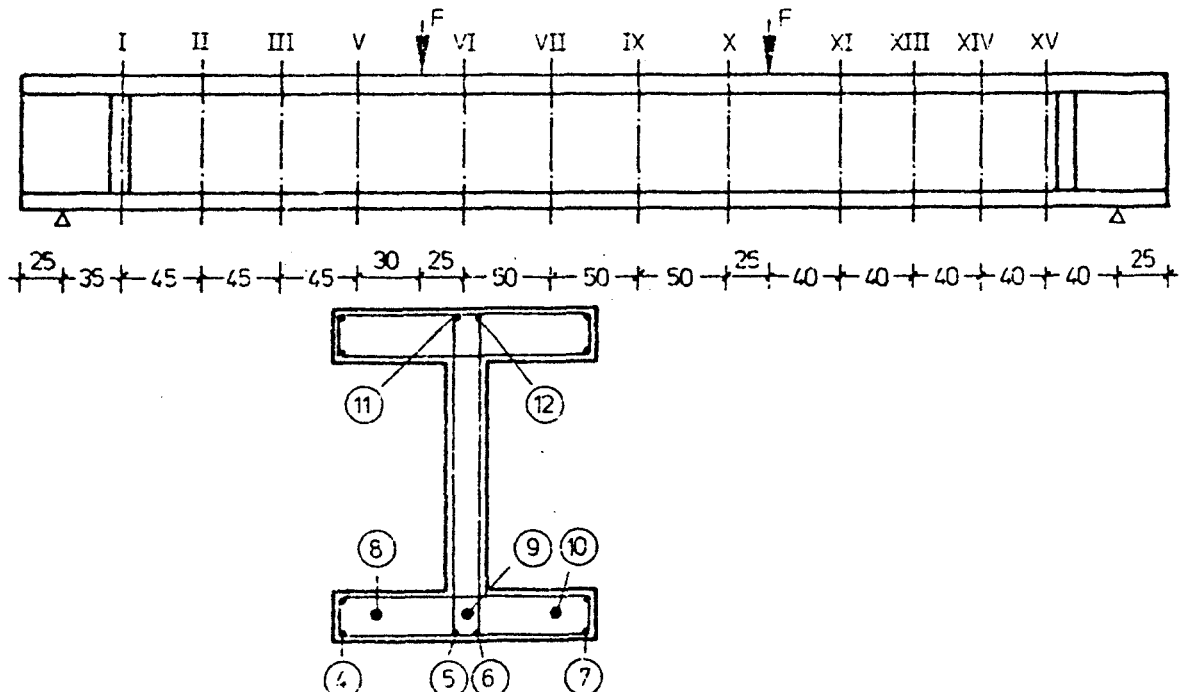
	Belastungsgrad F/F_{\max}													
Meßstelle	0.000	0.211	0.316	0.421	0.474	0.526	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	
	1						1					1		
MQ2/8	2.550	2.607	2.638	2.687	2.706	2.734	2.740	2.763	2.787	2.814	2.851	2.873	2.698	
MQ6/8	2.517	2.636	2.700	2.777	2.813	2.843	2.859	2.897	2.941	2.995	3.087	3.140	2.797	
MQ9/8	2.512	2.632	2.695	2.767	2.802	2.838	2.854	2.886	2.926	2.978	3.061	3.121	2.790	
MQ11/8	2.535	2.627	2.677	2.731	2.758	2.789	2.806	2.843	2.874	2.916	2.963	3.004	2.756	
MQ13/8	2.474	2.545	2.581	2.622	2.643	2.672	2.690	2.722	2.749	2.781	2.811	2.836	2.651	
MQ1/9	2.549	2.573	2.585	2.610	2.619	2.631	2.635	2.652	2.667	2.686	2.701	2.713	2.620	
MQ5/9	2.582	2.698	2.760	2.837	2.872	2.901	2.913	2.947	2.988	3.041	3.123	3.179	2.862	
MQ7/9	2.518	2.637	2.703	2.781	2.820	2.857	2.873	2.909	2.952	3.004	3.072	3.126	2.813	
MQ10/9	2.526	2.650	2.715	2.788	2.823	2.861	2.876	2.912	2.954	3.011	3.078	3.136	2.809	
MQ14/9	2.548	2.588	2.611	2.634	2.646	2.675	2.685	2.708	2.731	2.750	2.770	2.780	2.650	
MQ3/10	2.501	2.570	2.607	2.660	2.686	2.710	2.712	2.740	2.771	2.800	2.865	2.904	2.690	
MQ6/10	2.590	2.701	2.762	2.839	2.879	2.906	2.918	2.953	2.997	3.058	3.127	3.180	2.850	
MQ11/10	2.516	2.598	2.644	2.692	2.718	2.747	2.761	2.797	2.825	2.866	2.909	2.951	2.722	
MQ15/10	2.568	2.583	2.591	2.600	2.605	2.614	2.619	2.636	2.649	2.662	2.676	2.693	2.626	
MQ1/5	-0.654	-0.635	-0.624	-0.608	-0.604	-0.616	-0.620	-0.614	-0.603	-0.588	-0.571	-0.553	-0.630	
MQ1/6	-0.666	-0.644	-0.634	-0.618	-0.615	-0.629	-0.633	-0.625	-0.616	-0.603	-0.584	-0.568	-0.643	
MQ2/7	-0.639	-0.582	-0.553	-0.505	-0.487	-0.458	-0.455	-0.429	-0.408	-0.383	-0.351	-0.312	-0.484	
MQ5/5	-0.678	-0.547	-0.478	-0.393	-0.350	-0.312	-0.303	-0.261	-0.205	-0.123	0.062	0.176	-0.317	
MQ5/6	-0.688	-0.555	-0.485	-0.398	-0.356	-0.319	-0.308	-0.267	-0.217	-0.144	0.052	0.168	-0.328	
MQ7/5	-0.624	-0.483	-0.408	-0.321	-0.276	-0.237	-0.222	-0.176	-0.122	-0.053	0.052	0.164	-0.260	
MQ7/6	-0.622	-0.482	-0.408	-0.323	-0.277	-0.238	-0.224	-0.180	-0.134	-0.064	0.063	0.174	-0.281	
MQ10/5	-0.647	-0.499	-0.420	-0.333	-0.287	-0.243	-0.230	-0.184	-0.125	-0.039	0.072	0.178	-0.285	
MQ10/6	-0.628	-0.485	-0.408	-0.323	-0.278	-0.237	-0.223	-0.177	-0.121	-0.028	0.093	0.210	-0.278	
MQ13/4	-0.698	-0.608	-0.558	-0.501	-0.474	-0.435	-0.415	-0.375	-0.336	-0.293	-0.258	-0.224	-0.471	
MQ14/5	-0.673	-0.619	-0.588	-0.553	-0.536	-0.498	-0.490	-0.464	-0.430	-0.411	-0.393	-0.377	-0.549	
MQ1/11	0.184	0.165	0.157	0.186	0.193	0.206	0.209	0.218	0.229	0.247	0.285	0.385	0.327	
MQ5/11	0.112	-0.062	-0.155	-0.234	-0.283	-0.361	-0.401	-0.452	-0.495	-0.544	-0.586	-0.740	-0.439	
MQ5/12	0.109	-0.070	-0.166	-0.251	-0.304	-0.383	-0.420	-0.471	-0.516	-0.567	-0.611	-0.765	-0.444	
MQ7/11	0.094	-0.103	-0.209	-0.314	-0.373	-0.428	-0.466	-0.515	-0.566	-0.640	-0.722	-0.913	-0.556	
MQ7/12	0.085	-0.119	-0.228	-0.336	-0.398	-0.457	-0.497	-0.548	-0.602	-0.680	-0.769	-0.985	-0.610	
MQ10/11	0.070	-0.117	-0.221	-0.328	-0.390	-0.447	-0.484	-0.540	-0.595	-0.670	-0.758	-0.954	-0.571	
MQ10/12	0.070	-0.108	-0.209	-0.316	-0.378	-0.432	-0.469	-0.523	-0.577	-0.652	-0.737	-0.940	-0.558	
MQ14/11	0.107	0.029	-0.012	-0.055	-0.078	-0.066	-0.055	-0.053	-0.054	-0.058	-0.064	-0.073	0.007	
MQ14/12	0.134	0.048	0.000	-0.047	-0.073	-0.059	-0.046	-0.043	-0.044	-0.048	-0.058	-0.065	0.021	



Anlage A5.1: Längsstahldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
1. Laststellung

Längsstahldehnungen in mm/m $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

	Belastungsgrad F/F_{\max}												
Meßstelle	0.000	0.296	0.737	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.379	0.737
	2	1	2	3	2	4	3	5	4	6	5		7
MQ2/8	2.580	2.686	2.874	2.878	2.671	2.860	2.661	2.847	2.697	2.882	2.645	2.678	2.832
MQ6/8	2.602	2.779	3.221	3.228	2.758	3.208	2.755	3.200	2.762	3.219	2.734	2.784	3.119
MQ9/8	2.593	2.768	3.180	3.187	2.750	3.174	2.752	3.172	2.745	3.184	2.725	2.775	3.172
MQ11/8	2.587	2.740	3.022	3.028	2.725	3.031	2.725	3.028	2.715	3.022	2.700	2.747	3.010
MQ13/8	2.518	2.639	2.839	2.844	2.625	2.834	2.625	2.828	2.615	2.820	2.599	2.635	2.805
MQ1/9	2.555	2.612	2.714	2.717	2.600	2.703	2.586	2.688	2.613	2.713	2.568	2.587	2.668
MQ5/9	2.665	2.840	3.200	3.207	2.818	3.185	2.811	3.177	2.836	3.212	2.807	2.860	3.176
MQ7/9	2.621	2.783	3.166	3.175	2.753	3.150	2.759	3.159	2.760	3.171	2.741	2.793	3.158
MQ10/9	2.611	2.793	3.180	3.186	2.772	3.163	2.775	3.157	2.765	3.183	2.748	2.800	3.180
MQ14/9	2.564	2.642	2.778	2.781	2.629	2.769	2.623	2.759	2.612	2.749	2.599	2.624	2.738
MQ3/10	2.554	2.675	2.919	2.923	2.665	2.909	2.656	2.895	2.696	2.939	2.645	2.684	2.886
MQ6/10	2.673	2.840	3.301	3.306	2.820	3.279	2.814	3.267	2.824	3.293	2.793	2.843	3.267
MQ11/10	2.578	2.707	2.959	2.965	2.697	2.961	2.695	2.953	2.689	2.954	2.679	2.721	2.946
MQ15/10	2.588	2.622	2.697	2.700	2.616	2.690	2.607	2.679	2.599	2.676	2.589	2.603	2.668
MQ1/5	-0.670	-0.636	-0.547	-0.544	-0.641	-0.553	-0.660	-0.573	-0.630	-0.542	-0.667	-0.652	-0.580
MQ1/6	-0.683	-0.651	-0.563	-0.561	-0.656	-0.571	-0.679	-0.594	-0.645	-0.560	-0.684	-0.667	-0.597
MQ2/7	-0.595	-0.494	-0.307	-0.305	-0.497	-0.315	-0.515	-0.336	-0.474	-0.293	-0.511	-0.478	-0.330
MQ5/5	-0.573	-0.352	0.203	0.209	-0.364	0.186	-0.363	0.173	-0.323	0.217	-0.349	-0.274	0.188
MQ5/6	-0.579	-0.360	0.211	0.218	-0.373	0.195	-0.377	0.181	-0.331	0.238	-0.364	-0.292	0.201
MQ7/5	-0.497	-0.288	0.265	0.274	-0.312	0.243	-0.310	0.241	-0.295	0.272	-0.307	-0.244	0.265
MQ7/6	-0.510	-0.309	0.274	0.283	-0.333	0.256	-0.334	0.252	-0.327	0.273	-0.341	-0.281	0.263
MQ10/5	-0.532	-0.314	0.260	0.268	-0.329	0.245	-0.324	0.249	-0.319	0.330	-0.327	-0.259	0.344
MQ10/6	-0.520	-0.311	0.263	0.271	-0.333	0.237	-0.330	0.234	-0.327	0.285	-0.338	-0.274	0.304
MQ13/4	-0.654	-0.488	-0.226	-0.224	-0.499	-0.237	-0.487	-0.232	-0.502	-0.249	-0.516	-0.470	-0.265
MQ14/5	-0.662	-0.560	-0.380	-0.380	-0.573	-0.390	-0.569	-0.387	-0.585	-0.403	-0.596	-0.564	-0.415
MQ1/11	0.276	0.314	0.407	0.407	0.316	0.413	0.331	0.429	0.362	0.458	0.341	0.358	0.436
MQ5/11	-0.140	-0.409	-0.731	-0.739	-0.417	-0.735	-0.448	-0.745	-0.454	-0.758	-0.507	-0.565	-0.813
MQ5/12	-0.139	-0.417	-0.757	-0.764	-0.422	-0.759	-0.455	-0.770	-0.462	-0.784	-0.508	-0.570	-0.832
MQ7/11	-0.190	-0.516	-0.923	-0.930	-0.529	-0.934	-0.568	-0.948	-0.615	-1.001	-0.647	-0.717	-1.033
MQ7/12	-0.232	-0.567	-0.995	-1.002	-0.582	-1.008	-0.622	-1.020	-0.674	-1.078	-0.712	-0.786	-1.118
MQ10/11	-0.230	-0.535	-0.962	-0.972	-0.545	-0.978	-0.582	-0.990	-0.637	-1.050	-0.666	-0.741	-1.083
MQ10/12	-0.233	-0.525	-0.947	-0.953	-0.538	-0.965	-0.581	-0.988	-0.631	-1.042	-0.662	-0.736	-1.074
MQ14/11	0.071	0.010	-0.062	-0.061	0.003	-0.065	-0.002	-0.069	-0.020	-0.086	-0.027	-0.040	-0.092
MQ14/12	0.091	0.025	-0.053	-0.052	0.019	-0.056	0.013	-0.059	-0.007	-0.077	-0.016	-0.029	-0.086



Anlage A5.2: Längsstahldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
1. Laststellung

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.789	0.842	0.000	0.211	0.316	0.379	0.421	0.474	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737
			3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	8
MQ2/8	2.865	2.902	2.516	2.587	2.667	2.708	2.727	2.755	2.780	2.809	2.836	2.859	2.888
MQ6/8	3.292	3.436	2.540	2.661	2.733	2.790	2.820	2.864	2.914	2.988	3.085	3.182	3.291
MQ9/8	3.261	3.407	2.528	2.648	2.709	2.759	2.788	2.833	2.883	2.957	3.051	3.146	3.250
MQ11/8	3.060	3.120	2.528	2.633	2.692	2.739	2.768	2.811	2.860	2.916	2.984	3.063	3.151
MQ13/8	2.836	2.870	2.491	2.573	2.616	2.651	2.669	2.698	2.726	2.757	2.788	2.819	2.854
MQ1/9	2.684	2.705	2.472	2.513	2.579	2.603	2.612	2.627	2.642	2.655	2.668	2.676	2.690
MQ5/9	3.240	3.373	2.755	2.877	2.975	3.042	3.078	3.127	3.179	3.238	3.286	3.340	3.486
MQ7/9	3.243	3.442	2.565	2.682	2.747	2.802	2.832	2.878	2.927	2.999	3.102	3.204	3.313
MQ10/9	3.269	3.435	2.559	2.682	2.743	2.794	2.824	2.870	2.921	2.991	3.091	3.194	3.303
MQ14/9	2.757	2.780	2.492	2.547	2.577	2.600	2.613	2.631	2.649	2.668	2.687	2.701	2.721
MQ3/10	2.926	2.977	2.530	2.607	2.687	2.731	2.755	2.788	2.823	2.868	2.915	2.972	3.035
MQ6/10	3.374	3.516	2.624	2.736	2.802	2.859	2.893	2.939	2.991	3.071	3.163	3.257	3.357
MQ11/10	2.989	3.046	2.551	2.639	2.688	2.727	2.753	2.789	2.826	2.869	2.917	2.973	3.040
MQ15/10	2.680	2.697	2.540	2.563	2.577	2.591	2.600	2.612	2.622	2.634	2.645	2.653	2.662
MQ1/5	-0.564	-0.544	-0.734	-0.714	-0.655	-0.637	-0.625	-0.612	-0.598	-0.585	-0.571	-0.562	-0.550
MQ1/6	-0.581	-0.563	-0.757	-0.737	-0.674	-0.656	-0.645	-0.633	-0.619	-0.605	-0.592	-0.586	-0.575
MQ2/7	-0.300	-0.268	-0.620	-0.554	-0.470	-0.437	-0.416	-0.390	-0.365	-0.340	-0.314	-0.296	-0.273
MQ5/5	0.280	0.411	-0.525	-0.379	-0.271	-0.195	-0.146	-0.084	-0.020	0.056	0.142	0.276	0.428
MQ5/6	0.300	0.412	-0.554	-0.407	-0.294	-0.217	-0.165	-0.100	-0.033	0.044	0.134	0.265	0.417
MQ7/5	0.378	0.705	-0.518	-0.378	-0.295	-0.232	-0.190	-0.133	-0.062	0.030	0.163	0.316	0.480
MQ7/6	0.381	0.688	-0.557	-0.420	-0.342	-0.285	-0.246	-0.191	-0.123	-0.029	0.104	0.256	0.413
MQ10/5	0.486	0.691	-0.545	-0.397	-0.315	-0.252	-0.207	-0.144	-0.075	0.018	0.153	0.301	0.453
MQ10/6	0.461	0.722	-0.552	-0.411	-0.331	-0.272	-0.232	-0.175	-0.108	-0.015	0.119	0.267	0.424
MQ13/4	-0.232	-0.195	-0.668	-0.549	-0.500	-0.460	-0.432	-0.398	-0.361	-0.322	-0.281	-0.227	-0.176
MQ14/5	-0.389	-0.360	-0.722	-0.644	-0.615	-0.588	-0.569	-0.545	-0.522	-0.498	-0.474	-0.445	-0.419
MQ1/11	0.449	0.471	0.302	0.340	0.391	0.415	0.428	0.444	0.461	0.477	0.494	0.512	0.529
MQ5/11	-0.862	-0.900	-0.319	-0.521	-0.600	-0.634	-0.666	-0.702	-0.740	-0.780	-0.816	-0.848	-0.883
MQ5/12	-0.883	-0.923	-0.309	-0.518	-0.600	-0.641	-0.672	-0.712	-0.750	-0.792	-0.829	-0.868	-0.905
MQ7/11	-1.095	-1.162	-0.418	-0.655	-0.778	-0.838	-0.880	-0.927	-0.977	-1.032	-1.086	-1.132	-1.182
MQ7/12	-1.184	-1.258	-0.499	-0.738	-0.864	-0.926	-0.970	-1.020	-1.071	-1.129	-1.184	-1.236	-1.289
MQ10/11	-1.150	-1.220	-0.492	-0.698	-0.820	-0.884	-0.928	-0.980	-1.031	-1.091	-1.148	-1.201	-1.258
MQ10/12	-1.136	-1.209	-0.525	-0.725	-0.838	-0.897	-0.940	-0.991	-1.042	-1.100	-1.157	-1.215	-1.272
MQ14/11	-0.101	-0.103	-0.004	-0.047	-0.070	-0.077	-0.083	-0.090	-0.097	-0.104	-0.110	-0.117	-0.123
MQ14/12	-0.096	-0.100	0.009	-0.035	-0.060	-0.067	-0.074	-0.082	-0.089	-0.098	-0.104	-0.110	-0.117

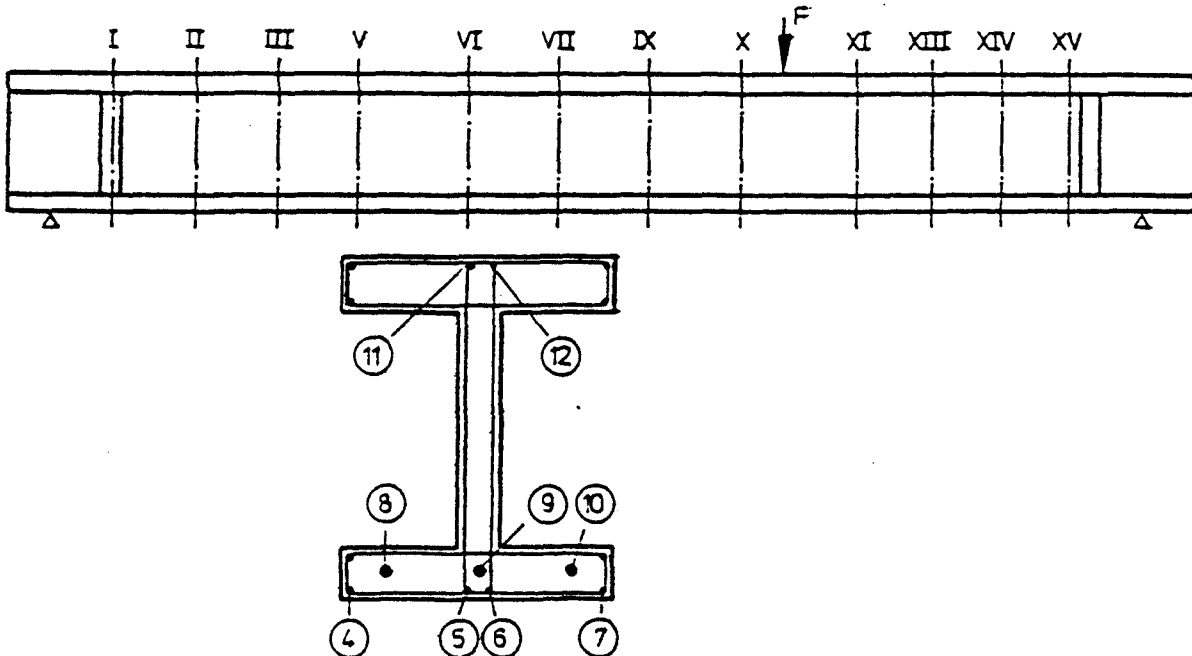
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}						
	0.789	0.842	0.842	0.895	0.947	0.974	1.000
	1	1	2				
MQ2/8	2.913	2.940	2.946	2.980	3.036	3.151	3.215
MQ6/8	3.394	3.495	3.508	3.611	3.740	3.814	3.893
MQ9/8	3.346	3.443	3.455	3.550	3.672	3.742	3.822
MQ11/8	3.228	3.301	3.311	3.385	3.482	3.538	3.601
MQ13/8	2.883	2.912	2.920	2.949	3.014	3.107	3.142
MQ1/9	2.700	2.712	2.717	2.738	2.763	2.775	2.790
MQ5/9	3.628	3.679	3.674	3.793	3.964	4.055	4.133
MQ7/9	3.419	3.518	3.532	3.634	3.771	3.852	3.944
MQ10/9	3.405	3.503	3.514	3.615	3.740	3.820	3.900
MQ14/9	2.735	2.752	2.755	2.773	2.795	2.802	2.813
MQ3/10	3.089	3.133	3.141	3.196	3.275	3.336	3.397
MQ6/10	3.460	3.562	3.578	3.681	3.811	3.898	3.984
MQ11/10	3.105	3.168	3.178	3.239	3.324	3.375	3.427
MQ15/10	2.670	2.680	2.684	2.691	2.705	2.712	2.719
MQ1/5	-0.540	-0.529	-0.526	-0.514	-0.492	-0.485	-0.470
MQ1/6	-0.566	-0.555	-0.552	-0.540	-0.518	-0.505	-0.489
MQ2/7	-0.252	-0.230	-0.224	-0.198	-0.158	-0.113	-0.024
MQ5/5	0.572	0.707	0.723	0.859	1.022	1.126	1.220
MQ5/6	0.560	0.694	0.711	0.847	1.021	1.132	1.232
MQ7/5	0.635	0.780	0.794	0.938	1.113	1.207	1.307
MQ7/6	0.563	0.706	0.719	0.858	1.017	1.103	1.194
MQ10/5	0.599	0.736	0.749	0.888	1.052	1.144	1.236
MQ10/6	0.580	0.731	0.744	0.895	1.073	1.167	1.263
MQ13/4	-0.129	-0.084	-0.076	-0.028	0.231	0.339	0.420
MQ14/5	-0.394	-0.371	-0.369	-0.345	-0.325	-0.308	-0.296
MQ1/11	0.544	0.559	0.561	0.578	0.598	0.620	0.637
MQ5/11	-0.919	-0.953	-0.974	-1.013	-1.070	-1.110	-1.138
MQ5/12	-0.943	-0.980	-0.999	-1.041	-1.098	-1.142	-1.170
MQ7/11	-1.230	-1.278	-1.303	-1.354	-1.423	-1.470	-1.501
MQ7/12	-1.340	-1.390	-1.417	-1.472	-1.547	-1.602	-1.637
MQ10/11	-1.313	-1.366	-1.394	-1.451	-1.532	-1.588	-1.628
MQ10/12	-1.330	-1.384	-1.412	-1.472	-1.556	-1.621	-1.664
MQ14/11	-0.132	-0.138	-0.140	-0.148	-0.154	-0.157	-0.160
MQ14/12	-0.125	-0.132	-0.136	-0.143	-0.150	-0.152	-0.155

Anlage A5.3: Längsstahldehnungen des Versuchsbalkens SB 5

1. Laststellung

Längsstahldehnungen in mm/m $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

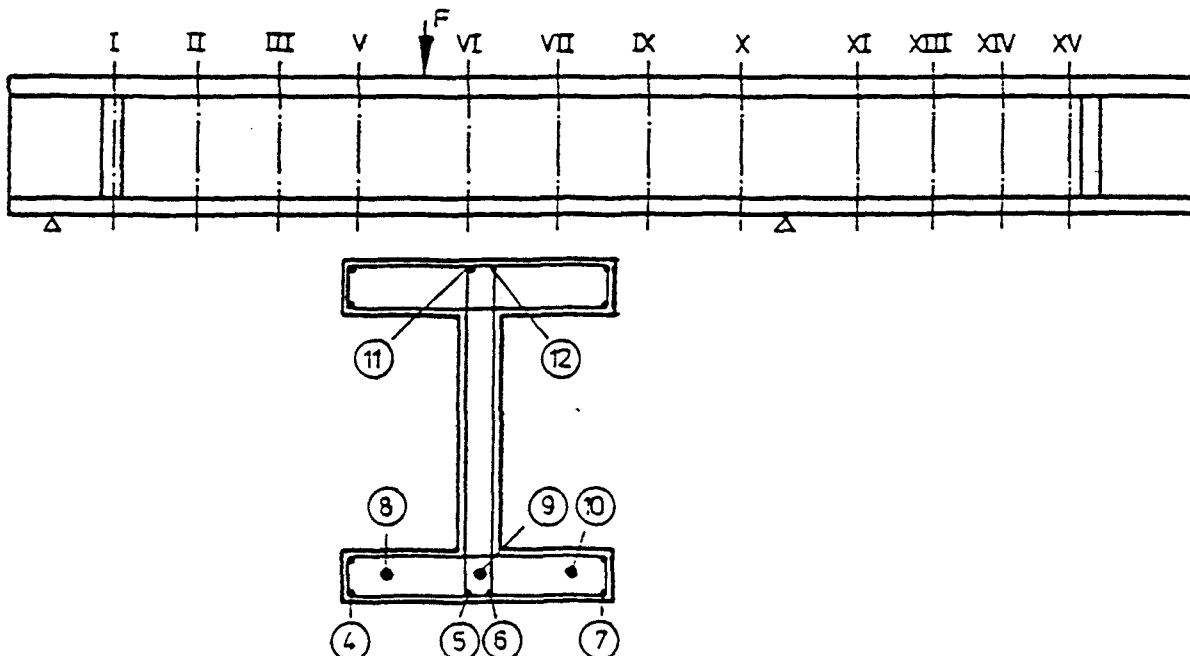
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}														
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947	1.000	0.632
	1														1
MQ2/8	2.528	2.556	2.582	2.614	2.648	2.679	2.707	2.728	2.746	2.759	2.785	2.799	2.824	2.857	2.732
MQ6/8	2.537	2.587	2.637	2.695	2.751	2.819	2.919	2.998	3.221	3.331	3.460	3.580	3.717	3.856	3.189
MQ9/8	2.480	2.547	2.620	2.703	2.812	2.985	3.287	3.409	3.544	3.683	3.833	4.132	4.546	4.850	3.883
MQ11/8	2.479	2.545	2.627	2.731	2.874	3.108	3.333	3.452	3.575	3.749	3.971	4.280	4.843	5.521	4.537
MQ13/8	2.420	2.471	2.536	2.611	2.697	2.824	2.966	3.043	3.125	3.220	3.344	3.478	3.666	3.916	3.191
MQ1/9	2.469	2.488	2.506	2.528	2.550	2.569	2.585	2.598	2.609	2.617	2.629	2.636	2.649	2.659	2.601
MQ5/9	2.796	2.847	2.890	2.940	2.992	3.052	3.112	3.152	3.215	3.264	3.350	3.419	3.482	3.491	3.238
MQ7/9	2.561	2.619	2.680	2.748	2.822	2.924	3.218	3.352	3.505	3.631	3.767	3.902	4.084	4.437	3.602
MQ10/9	2.537	2.615	2.703	2.810	2.953	3.225	3.500	3.645	3.792	3.960	4.255	4.750	5.434	- - -	- - -
MQ14/9	2.453	2.487	2.531	2.581	2.634	2.689	2.738	2.765	2.792	2.832	2.940	3.029	3.141	3.259	2.920
MQ3/10	2.500	2.529	2.557	2.590	2.624	2.663	2.698	2.723	2.746	2.768	2.801	2.830	2.886	2.945	2.751
MQ6/10	2.626	2.672	2.717	2.770	2.827	2.895	2.989	3.067	3.273	3.377	3.500	3.620	3.753	3.888	3.263
MQ11/10	2.486	2.542	2.613	2.697	2.806	2.987	3.178	3.283	3.387	3.521	3.687	3.903	4.268	4.786	3.868
MQ15/10	2.503	2.516	2.540	2.569	2.601	2.638	2.665	2.684	2.699	2.721	2.767	2.827	2.920	3.044	2.895
MQ1/5	-0.765	-0.754	-0.741	-0.728	-0.708	-0.693	-0.679	-0.666	-0.660	-0.650	-0.646	-0.638	-0.624	-0.613	-0.667
MQ1/6	-0.788	-0.778	-0.765	-0.750	-0.733	-0.718	-0.704	-0.693	-0.685	-0.678	-0.669	-0.662	-0.647	-0.635	-0.691
MQ2/7	-0.600	-0.576	-0.550	-0.523	-0.491	-0.460	-0.434	-0.414	-0.399	-0.384	-0.371	-0.354	-0.331	-0.308	-0.413
MQ5/5	-0.551	-0.499	-0.446	-0.385	-0.323	-0.251	-0.177	-0.130	-0.092	-0.049	-0.002	0.060	0.157	0.256	-0.119
MQ5/6	-0.567	-0.512	-0.457	-0.395	-0.334	-0.260	-0.186	-0.138	-0.095	-0.045	0.000	0.064	0.169	0.283	-0.115
MQ7/5	-0.542	-0.476	-0.406	-0.329	-0.243	-0.130	0.154	0.339	0.572	0.730	0.866	1.007	1.205	1.501	0.585
MQ7/6	-0.583	-0.519	-0.453	-0.379	-0.298	-0.190	0.104	0.286	0.516	0.687	0.859	1.022	1.233	1.587	0.596
MQ10/5	-0.584	-0.492	-0.385	-0.257	-0.071	0.269	0.663	0.864	1.063	1.272	1.552	1.982	2.655	- - -	- - -
MQ10/6	-0.585	-0.496	-0.394	-0.275	-0.103	0.238	0.651	0.865	1.081	1.303	1.584	2.024	2.725	4.939	3.813
MQ13/4	-0.707	-0.634	-0.545	-0.449	-0.331	-0.098	0.170	0.297	0.448	0.634	0.801	1.001	1.332	1.853	0.826
MQ14/5	-0.768	-0.720	-0.662	-0.600	-0.529	-0.458	-0.384	-0.356	-0.320	-0.272	0.105	0.311	0.519	0.769	0.010
MQ1/11	0.275	0.284	0.299	0.322	0.352	0.382	0.420	0.431	0.449	0.460	0.475	0.493	0.510	0.524	0.454
MQ5/11	-0.339	-0.394	-0.463	-0.523	-0.574	-0.629	-0.665	-0.700	-0.718	-0.751	-0.771	-0.795	-0.816	-0.839	-0.691
MQ5/12	-0.331	-0.388	-0.459	-0.520	-0.577	-0.634	-0.675	-0.709	-0.730	-0.759	-0.778	-0.805	-0.826	-0.850	-0.697
MQ7/11	-0.418	-0.522	-0.646	-0.760	-0.861	-0.970	-1.022	-1.081	-1.101	-1.148	-1.211	-1.256	-1.300	-1.342	-1.085
MQ7/12	-0.514	-0.618	-0.743	-0.861	-0.968	-1.083	-1.140	-1.199	-1.221	-1.271	-1.337	-1.384	-1.433	-1.477	-1.206
MQ10/11	-0.507	-0.632	-0.773	-0.917	-1.062	-1.240	-1.446	-1.558	-1.653	-1.779	-1.940	-2.141	-2.431	-2.922	-2.409
MQ10/12	-0.578	-0.699	-0.833	-0.972	-1.116	-1.293	-1.506	-1.616	-1.714	-1.855	-2.043	-2.286	-2.644	-3.384	-2.864
MQ14/11	-0.006	-0.036	-0.056	-0.076	-0.096	-0.117	-0.135	-0.149	-0.156	-0.165	-0.162	-0.157	-0.146	-0.127	-0.063
MQ14/12	0.008	-0.022	-0.043	-0.064	-0.085	-0.109	-0.127	-0.143	-0.150	-0.161	-0.156	-0.151	-0.139	-0.117	-0.050



Anlage A5.4: Längsstahldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
2. Laststellung

Längsstahldehnungen in mm/m $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

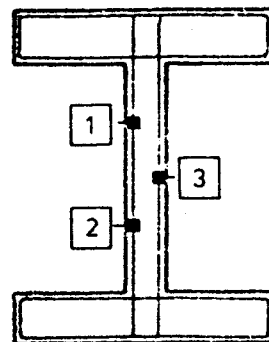
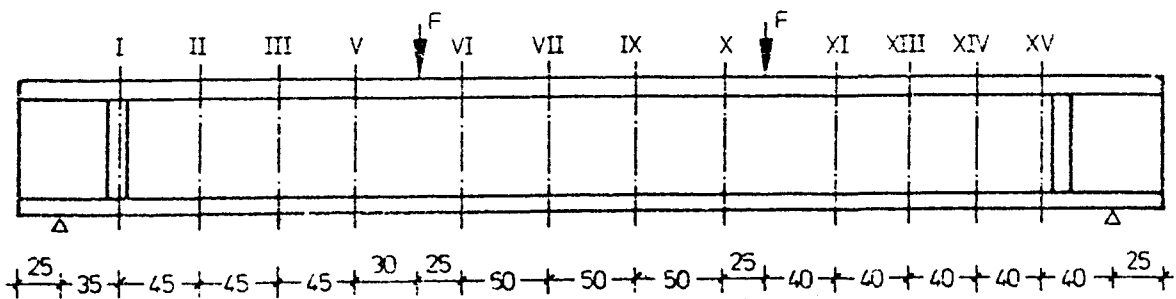
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}														
	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.657	0.707	0.758	0.809	0.859	0.909	0.960	1.000
	1														
MQ2/8	2.486	2.520	2.565	2.612	2.665	2.720	2.787	2.834	2.895	2.955	3.017	3.075	3.135	3.209	3.277
MQ6/8	2.471	2.518	2.573	2.628	2.693	2.774	2.873	2.947	3.046	3.150	3.265	3.374	3.498	3.604	3.669
MQ9/8	2.300	2.316	2.339	2.378	2.417	2.523	2.630	2.703	2.799	2.890	2.976	3.064	3.178	3.296	3.358
MQ1/9	2.433	2.454	2.486	2.515	2.547	2.580	2.613	2.632	2.650	2.666	2.685	2.701	2.720	2.740	2.759
MQ5/9	2.805	2.864	2.933	3.008	3.094	3.180	3.315	3.429	3.537	3.607	3.719	3.755	3.882	4.102	4.183
MQ7/9	2.604	2.636	2.671	2.715	2.767	2.857	2.940	2.998	3.079	3.160	3.224	3.278	3.378	3.497	3.574
MQ3/10	2.470	2.504	2.551	2.596	2.658	2.726	2.821	2.887	2.962	3.037	3.113	3.189	3.266	3.358	3.427
MQ6/10	2.601	2.645	2.692	2.740	2.801	2.883	2.989	3.068	3.159	3.260	3.369	3.475	3.592	3.704	3.775
MQ1/5	-0.794	-0.782	-0.761	-0.739	-0.709	-0.680	-0.650	-0.631	-0.615	-0.597	-0.580	-0.565	-0.548	-0.528	-0.512
MQ1/6	-0.819	-0.809	-0.788	-0.768	-0.741	-0.711	-0.681	-0.661	-0.643	-0.625	-0.608	-0.591	-0.575	-0.557	-0.544
MQ2/7	-0.637	-0.608	-0.567	-0.525	-0.472	-0.422	-0.363	-0.323	-0.278	-0.228	-0.178	-0.129	-0.078	-0.006	0.110
MQ5/5	-0.605	-0.528	-0.440	-0.351	-0.235	-0.110	0.060	0.198	0.355	0.506	0.655	0.805	0.955	1.121	1.232
MQ5/6	-0.621	-0.545	-0.457	-0.368	-0.249	-0.117	0.054	0.196	0.354	0.509	0.660	0.813	0.965	1.136	1.252
MQ7/5	-0.532	-0.486	-0.437	-0.383	-0.315	-0.168	-0.020	0.067	0.199	0.341	0.528	0.758	1.125	1.402	1.608
MQ7/6	-0.541	-0.499	-0.452	-0.400	-0.333	-0.198	-0.064	0.017	0.142	0.284	0.468	0.686	1.060	1.336	1.541
MQ10/6	3.431	3.453	3.493	3.584	3.624	3.660	3.707	3.728	3.791	3.835	3.736	3.817	3.862	3.871	3.868
MQ1/11	0.266	0.277	0.312	0.359	0.409	0.453	0.498	0.521	0.538	0.552	0.570	0.588	0.607	0.631	0.652
MQ5/11	-0.304	-0.403	-0.508	-0.593	-0.682	-0.765	-0.853	-0.898	-0.945	-0.999	-1.041	-1.094	-1.197	-1.266	-1.326
MQ5/12	-0.298	-0.400	-0.509	-0.600	-0.695	-0.783	-0.875	-0.920	-0.970	-1.026	-1.075	-1.133	-1.184	-1.231	-1.276
MQ7/11	-0.378	-0.451	-0.540	-0.618	-0.711	-0.751	-0.806	-0.834	-0.852	-0.902	-0.926	-0.943	-0.924	-0.891	-0.858
MQ7/12	-0.475	-0.549	-0.640	-0.718	-0.816	-0.853	-0.907	-0.933	-0.951	-0.998	-1.019	-1.032	-1.005	-0.973	-0.940
MQ10/11	-1.077	-1.097	-1.090	-1.031	-1.012	-0.965	-0.928	-0.907	-0.882	-0.839	-0.679	-0.590	-0.509	-0.383	-0.201
MQ10/12	-1.458	-1.475	-1.462	-1.408	-1.386	-1.345	-1.317	-1.300	-1.275	-1.231	-1.108	-1.039	-0.976	-0.874	-0.715



Anlage A5.5: Längsstahldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
3. Laststellung

Bügeldehnungen in mm/m $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}											
	0.000	0.211	0.316	0.421	0.474	0.526	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737	0.737
	1						1					1
MQ1/1	-0.044	-0.037	-0.030	-0.016	0.000	0.049	0.070	0.085	0.102	0.134	0.141	0.159
MQ1/2	-0.028	-0.012	0.007	0.441	0.722	1.132	1.186	1.291	1.403	1.562	1.413	1.311
MQ1/3	0.006	0.025	0.039	0.089	0.084	0.081	0.081	0.095	0.099	0.124	0.368	0.491
MQ2/1	-0.037	-0.003	0.023	0.117	0.195	0.407	0.477	0.525	0.606	0.739	0.918	1.307
MQ2/3	-0.464	-0.457	-0.447	-0.429	-0.429	1.031	1.220	1.818	2.542	3.406	4.222	4.195
MQ3/1	-0.040	-0.010	0.011	0.057	0.091	1.063	1.255	1.515	1.925	2.240	2.388	2.743
MQ3/2	-0.018	0.000	0.016	0.057	0.081	0.072	0.106	0.195	0.562	0.980	1.158	1.579
MQ3/3	-0.014	-0.001	0.009	0.037	0.054	0.046	0.038	0.035	0.051	0.070	0.215	1.469
MQ5/1	-0.050	-0.054	-0.052	-0.034	-0.025	0.019	0.020	0.039	0.082	0.120	0.240	0.624
MQ5/2	-0.045	-0.054	-0.056	-0.043	-0.039	-0.017	-0.017	-0.005	-0.001	-0.015	0.692	0.883
MQ5/3	-0.058	-0.071	-0.076	-0.063	-0.057	-0.047	-0.049	-0.043	-0.044	-0.046	0.084	0.259
MQ6/1	-0.038	-0.053	-0.058	-0.054	-0.053	-0.057	-0.059	-0.060	-0.059	-0.059	-0.071	-0.112
MQ6/2	-0.020	-0.039	-0.047	-0.045	-0.047	-0.053	-0.054	-0.054	-0.053	-0.055	-0.057	-0.082
MQ6/3	-0.009	-0.032	-0.042	-0.042	-0.042	-0.049	-0.050	-0.052	-0.052	-0.054	-0.056	-0.074
MQ7/1	-0.031	-0.010	0.000	0.014	0.020	0.024	0.027	0.035	0.040	0.045	0.050	0.058
MQ7/2	-0.021	-0.012	-0.009	0.001	0.005	0.005	0.008	0.013	0.016	0.017	0.018	0.023
MQ7/3	0.005	0.002	-0.001	0.002	0.002	-0.001	0.002	0.004	0.002	-0.001	-0.001	0.010
MQ9/1	-0.033	-0.008	0.002	0.019	0.026	0.029	0.034	0.042	0.046	0.051	0.058	0.065
MQ9/2	-0.027	-0.020	-0.017	-0.006	-0.003	-0.003	-0.001	0.003	0.005	0.005	0.010	0.016
MQ9/3	0.001	0.001	0.000	0.003	0.004	0.000	0.003	0.005	0.002	-0.001	-0.004	0.005
MQ10/1	-0.029	-0.029	-0.031	-0.031	-0.034	-0.038	-0.040	-0.041	-0.046	-0.048	-0.052	-0.066
MQ10/2	-0.013	-0.022	-0.030	-0.033	-0.038	-0.043	-0.045	-0.045	-0.047	-0.048	-0.051	-0.051
MQ10/3	0.011	-0.006	-0.017	-0.024	-0.031	-0.038	-0.038	-0.037	-0.042	-0.045	-0.054	-0.047
MQ11/1	-0.025	-0.029	-0.029	-0.025	-0.023	0.001	0.049	0.081	0.173	0.302	0.416	0.655
MQ11/2	-0.042	-0.068	-0.080	-0.086	-0.091	-0.061	-0.013	0.628	0.749	0.816	0.916	0.973
MQ11/3	-0.035	-0.062	-0.071	-0.071	-0.070	-0.048	-0.032	-0.032	-0.032	-0.031	-0.032	-0.009
MQ13/1	-0.061	-0.056	-0.045	-0.024	-0.014	0.034	0.227	0.243	0.328	0.928	1.108	1.412
MQ13/2	-0.040	-0.044	-0.041	-0.032	-0.023	-0.010	0.001	0.029	0.133	0.383	0.494	0.745
MQ13/3	-0.023	-0.024	-0.016	0.015	0.056	0.294	0.489	0.994	1.403	1.409	1.563	1.866
MQ14/1	-0.052	-0.044	-0.032	-0.003	0.014	0.340	0.374	0.413	0.438	0.503	0.588	1.213
MQ14/3	-0.019	-0.035	-0.039	-0.032	-0.026	-0.019	0.104	0.249	0.743	1.190	1.371	1.525
MQ15/1	-0.074	-0.068	-0.060	-0.034	-0.020	0.166	0.184	0.198	0.208	0.235	0.263	0.378
MQ15/2	-0.050	-0.052	-0.043	-0.029	-0.024	0.220	0.370	0.414	0.447	0.532	0.625	0.897
MQ15/3	0.024	0.018	0.017	0.022	0.027	0.227	0.372	0.432	0.465	0.538	0.629	0.966

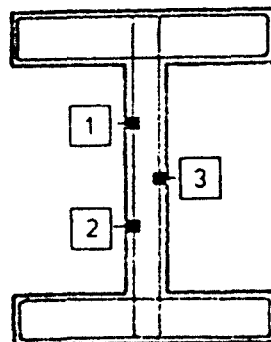
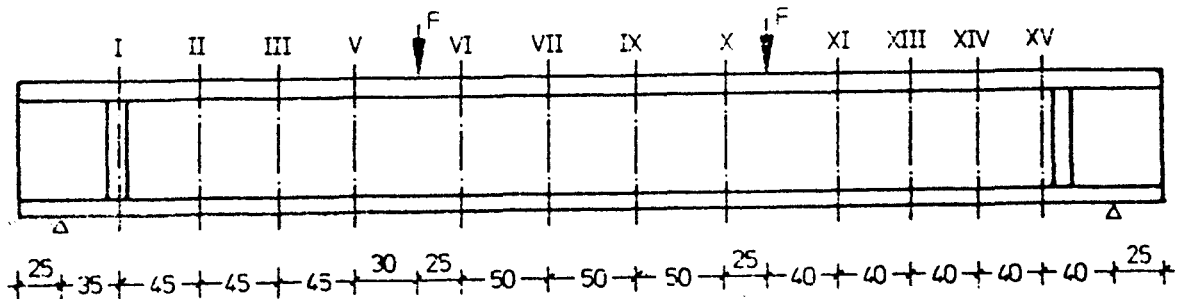


Anlage A5.6: Bügeldehnungen des Versuchsbalkens SB 5

1. Laststellung

Bügeldehnungen in mm/m $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

	Belastungsgrad F/F_{\max}												
Meßstelle	0.000	0.296	0.737	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.379	0.737
	2	1	2	3	2	4	3	5	4	6	5		7
MQ1/1	0.124	0.163	0.198	0.201	0.172	0.205	0.179	0.210	0.231	0.260	0.209	0.215	0.240
MQ1/2	0.482	0.798	1.267	1.271	0.795	1.257	0.799	1.251	0.855	1.295	0.842	0.914	1.280
MQ1/3	0.222	0.343	0.533	0.540	0.357	0.546	0.381	0.563	0.447	0.626	0.442	0.473	0.619
MQ2/1	0.542	0.920	1.394	1.408	0.949	1.431	1.013	1.480	1.108	1.580	1.141	1.226	1.600
MQ2/3	1.779	2.576	4.127	4.132	2.577	4.091	2.587	4.074	2.660	4.128	2.633	2.858	4.095
MQ3/1	1.136	1.752	2.690	2.700	1.765	2.695	1.811	2.716	1.876	2.779	1.891	2.046	2.768
MQ3/2	0.595	1.118	1.771	1.784	1.164	1.830	1.237	1.893	1.325	1.988	1.371	1.501	1.999
MQ3/3	0.651	1.084	1.806	1.823	1.157	1.895	1.231	1.978	1.337	2.112	1.379	1.513	2.147
MQ5/1	0.232	0.445	0.980	0.993	0.491	1.102	0.543	1.186	0.607	1.281	0.608	0.708	1.312
MQ5/2	0.213	0.412	0.907	0.908	0.407	0.889	0.409	0.881	0.423	0.889	0.400	0.479	0.860
MQ5/3	0.083	0.133	0.262	0.266	0.129	0.258	0.142	0.264	0.176	0.298	0.142	0.159	0.260
MQ6/1	-0.082	-0.087	-0.101	-0.102	-0.097	-0.108	-0.099	-0.107	-0.101	-0.109	-0.135	-0.138	-0.143
MQ6/2	-0.052	-0.062	-0.081	-0.082	-0.077	-0.096	-0.085	-0.100	-0.086	-0.104	-0.124	-0.127	-0.144
MQ6/3	-0.022	-0.038	-0.085	-0.085	-0.054	-0.099	-0.056	-0.098	-0.057	-0.100	-0.093	-0.097	-0.138
MQ7/1	0.009	0.035	0.060	0.065	0.026	0.051	0.018	0.042	0.019	0.042	0.007	0.014	0.031
MQ7/2	0.018	0.027	0.025	0.029	0.014	0.008	0.000	-0.003	0.003	-0.003	-0.016	-0.015	-0.023
MQ7/3	0.046	0.039	0.016	0.020	0.026	0.002	0.019	-0.004	0.020	-0.002	0.004	0.001	-0.017
MQ9/1	0.015	0.045	0.069	0.073	0.034	0.057	0.023	0.046	0.025	0.046	0.012	0.019	0.033
MQ9/2	0.008	0.019	0.013	0.018	0.001	-0.003	-0.009	-0.011	-0.009	-0.013	-0.027	-0.025	-0.029
MQ9/3	0.044	0.041	0.014	0.019	0.028	0.003	0.020	0.000	0.023	0.011	0.010	0.008	0.005
MQ10/1	-0.030	-0.032	-0.061	-0.060	-0.040	-0.074	-0.052	-0.085	-0.057	-0.093	-0.066	-0.070	-0.100
MQ10/2	-0.009	-0.020	-0.049	-0.046	-0.027	-0.058	-0.037	-0.068	-0.045	-0.073	-0.057	-0.061	-0.083
MQ10/3	0.030	0.008	-0.035	-0.033	0.001	-0.043	-0.005	-0.050	-0.007	-0.047	-0.011	-0.018	-0.045
MQ11/1	0.317	0.446	0.700	0.710	0.439	0.665	0.466	0.671	0.496	0.696	0.514	0.545	0.713
MQ11/2	0.194	0.452	1.062	1.066	0.375	0.889	0.387	0.900	0.384	0.904	0.385	0.471	0.903
MQ11/3	0.005	0.030	0.059	0.067	0.435	0.889	0.501	0.963	0.521	0.994	0.544	0.617	1.005
MQ13/1	0.505	0.892	1.464	1.475	0.902	1.465	0.956	1.494	0.986	1.523	1.032	1.136	1.540
MQ13/2	0.360	0.518	0.798	0.808	0.537	0.917	0.593	0.857	0.627	0.895	0.664	0.710	0.927
MQ13/3	0.554	1.012	1.980	1.990	1.059	2.020	1.109	2.024	1.139	2.045	1.175	1.339	2.056
MQ14/1	0.484	0.828	1.303	1.316	0.850	1.338	0.917	1.394	0.959	1.444	1.018	1.099	1.478
MQ14/3	0.439	0.883	1.628	1.639	0.900	1.655	0.948	1.689	0.980	1.724	1.012	1.176	1.747
MQ15/1	0.206	0.301	0.396	0.402	0.310	0.408	0.346	0.430	0.367	0.450	0.390	0.403	0.466
MQ15/2	0.399	0.643	0.968	0.975	0.652	0.988	0.696	1.020	0.724	1.050	0.783	0.834	1.066
MQ15/3	0.383	0.630	1.059	1.070	0.650	1.091	0.679	1.131	0.717	1.197	0.752	0.839	1.239



Anlage A5.7: Bügeldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
1. Laststellung

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.789	0.842	0.000	0.211	0.316	0.379	0.421	0.474	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737
			3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	8
MQ1/1	0.247	0.260	0.232	0.240	0.282	0.292	0.295	0.300	0.303	0.308	0.312	0.314	0.317
MQ1/2	1.335	1.386	0.631	0.787	0.874	0.939	0.983	1.036	1.089	1.144	1.196	1.243	1.293
MQ1/3	0.648	0.683	0.449	0.501	0.571	0.608	0.652	0.655	0.679	0.706	0.729	0.749	0.770
MQ2/1	1.658	1.713	0.711	1.023	1.223	1.332	1.398	1.475	1.549	1.620	1.683	1.738	1.796
MQ2/3	4.342	4.972	2.858	3.120	3.421	3.594	3.729	3.860	4.048	4.235	4.405	4.550	4.744
MQ3/1	2.914	3.188	2.094	2.470	2.733	2.888	2.985	3.104	3.227	3.353	3.475	3.592	3.714
MQ3/2	2.060	2.141	0.971	1.316	1.579	1.741	1.840	1.959	2.069	2.175	2.268	2.352	2.433
MQ3/3	2.276	2.467	1.541	1.695	1.935	2.103	2.210	2.335	2.461	2.585	2.706	2.820	2.939
MQ5/1	1.439	1.693	0.658	0.758	0.900	1.023	1.101	1.207	1.320	1.440	1.570	1.695	1.825
MQ5/2	0.927	1.012	0.295	0.318	0.395	0.460	0.498	0.546	0.597	0.645	0.697	0.727	0.767
MQ5/3	0.280	0.307	0.266	0.273	0.301	0.337	0.354	0.379	0.404	0.433	0.458	0.465	0.482
MQ6/1	-0.143	-0.142	-0.146	-0.150	-0.154	-0.145	-0.145	-0.145	-0.145	-0.144	-0.142	-0.147	-0.150
MQ6/2	-0.149	-0.172	-0.135	-0.146	-0.152	-0.143	-0.144	-0.145	-0.147	-0.148	-0.151	-0.168	-0.180
MQ6/3	-0.145	-0.147	-0.084	-0.100	-0.111	-0.103	-0.104	-0.107	-0.111	-0.118	-0.128	-0.140	-0.145
MQ7/1	0.035	0.043	-0.028	-0.012	-0.002	0.010	0.014	0.020	0.023	0.026	0.028	0.027	0.028
MQ7/2	-0.022	0.003	-0.034	-0.030	-0.025	-0.018	-0.016	-0.015	-0.014	-0.013	-0.012	-0.015	-0.015
MQ7/3	-0.014	-0.029	0.023	0.016	0.013	0.017	0.016	0.014	0.011	0.009	0.006	-0.002	-0.005
MQ9/1	0.037	0.043	-0.027	-0.007	0.006	0.018	0.022	0.028	0.032	0.034	0.037	0.034	0.036
MQ9/2	-0.026	-0.011	-0.045	-0.041	-0.037	-0.029	-0.028	-0.026	-0.025	-0.024	-0.022	-0.021	-0.015
MQ9/3	0.017	-0.004	0.013	0.006	0.005	0.011	0.010	0.009	0.007	0.006	0.012	0.002	-0.010
MQ10/1	-0.103	-0.099	-0.074	-0.075	-0.079	-0.076	-0.078	-0.080	-0.083	-0.087	-0.090	-0.097	-0.100
MQ10/2	-0.084	-0.073	-0.031	-0.045	-0.052	-0.050	-0.052	-0.053	-0.055	-0.058	-0.058	-0.058	-0.049
MQ10/3	-0.033	0.023	0.069	0.047	0.037	0.037	0.033	0.031	0.026	0.023	0.037	0.057	0.078
MQ11/1	0.746	0.790	0.454	0.533	0.590	0.626	0.651	0.681	0.710	0.741	0.771	0.797	0.825
MQ11/2	0.972	1.067	0.301	0.325	0.404	0.467	0.512	0.574	0.639	0.707	0.777	0.843	0.911
MQ11/3	1.080	1.178	0.447	0.478	0.551	0.621	0.663	0.713	0.762	0.812	0.860	0.907	0.961
MQ13/1	1.600	1.669	0.672	0.924	1.100	1.214	1.281	1.365	1.442	1.517	1.583	1.646	1.706
MQ13/2	0.965	1.009	0.622	0.741	0.837	0.905	0.945	0.993	1.039	1.086	1.126	1.165	1.205
MQ13/3	2.185	2.343	0.882	1.129	1.364	1.513	1.607	1.717	1.822	1.930	2.030	2.129	2.233
MQ14/1	1.536	1.604	0.743	0.962	1.116	1.220	1.285	1.365	1.440	1.514	1.580	1.642	1.703
MQ14/3	1.819	1.913	0.648	0.930	1.157	1.302	1.394	1.507	1.613	1.721	1.820	1.911	1.992
MQ15/1	0.478	0.495	0.373	0.434	0.456	0.475	0.486	0.498	0.510	0.523	0.534	0.542	0.552
MQ15/2	1.091	1.127	0.545	0.679	0.784	0.857	0.900	0.956	1.006	1.053	1.089	1.118	1.144
MQ15/3	1.305	1.387	0.557	0.705	0.828	0.911	0.966	1.035	1.102	1.172	1.238	1.302	1.366

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}						
	0.789	0.842	0.842	0.895	0.947	0.974	
	1	1	2				
MQ1/1	0.320	0.324	0.324	0.331	0.338	0.339	0.341
MQ1/2	1.341	1.387	1.398	1.429	1.458	1.465	1.471
MQ1/3	0.791	0.811	0.820	0.841	0.865	0.880	0.886
MQ2/1	1.849	1.897	1.924	1.957	1.989	2.013	2.023
MQ2/3	4.908	5.117	5.163	5.447	- - -	- - -	- - -
MQ3/1	3.829	3.952	4.046	4.324	5.038	5.883	- - -
MQ3/2	2.504	2.569	2.600	2.645	2.719	2.793	2.827
MQ3/3	3.052	3.167	3.227	3.378	3.634	3.791	3.841
MQ5/1	1.952	2.084	2.111	2.319	2.676	2.996	3.245
MQ5/2	0.805	0.848	0.857	0.898	0.963	0.957	0.955
MQ5/3	0.499	0.515	0.529	0.553	0.681	0.910	1.090
MQ6/1	-0.154	-0.159	-0.155	-0.163	-0.168	-0.168	-0.173
MQ6/2	-0.194	-0.206	-0.201	-0.218	-0.228	-0.235	-0.236
MQ6/3	-0.149	-0.154	-0.149	-0.156	-0.154	-0.149	-0.142
MQ7/1	0.028	0.028	0.034	0.031	0.029	0.030	0.029
MQ7/2	-0.018	-0.019	-0.012	-0.017	-0.020	-0.024	-0.040
MQ7/3	-0.011	-0.017	-0.011	-0.020	-0.020	-0.019	-0.019
MQ9/1	0.036	0.038	0.044	0.042	0.048	0.053	0.058
MQ9/2	-0.008	-0.002	0.002	0.006	0.018	0.020	0.019
MQ9/3	-0.024	-0.036	-0.030	-0.045	-0.057	-0.062	-0.067
MQ10/1	-0.104	-0.108	-0.107	-0.113	-0.114	-0.115	-0.111
MQ10/2	-0.041	-0.036	-0.035	-0.032	-0.016	-0.009	-0.013
MQ10/3	0.094	0.107	0.110	0.124	0.146	0.160	0.170
MQ11/1	0.850	0.874	0.891	0.913	0.954	1.008	1.036
MQ11/2	0.979	1.045	1.048	1.127	1.257	1.369	1.438
MQ11/3	1.020	1.078	1.085	1.146	1.271	1.347	1.394
MQ13/1	1.761	1.812	1.831	1.879	1.940	1.994	2.026
MQ13/2	1.240	1.273	1.293	1.325	1.372	1.410	1.430
MQ13/3	2.334	2.433	2.460	2.582	2.762	2.835	2.915
MQ14/1	1.757	1.807	1.825	1.875	1.944	1.999	2.034
MQ14/3	2.062	2.124	2.143	2.202	2.290	2.359	2.406
MQ15/1	0.559	0.565	0.572	0.579	0.594	0.608	0.614
MQ15/2	1.164	1.180	1.185	1.203	1.231	1.254	1.267
MQ15/3	1.423	1.479	1.495	1.550	1.630	1.691	1.733

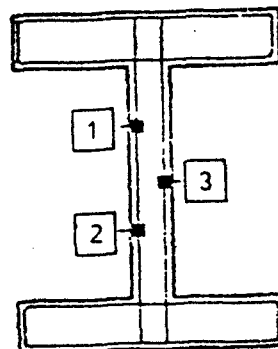
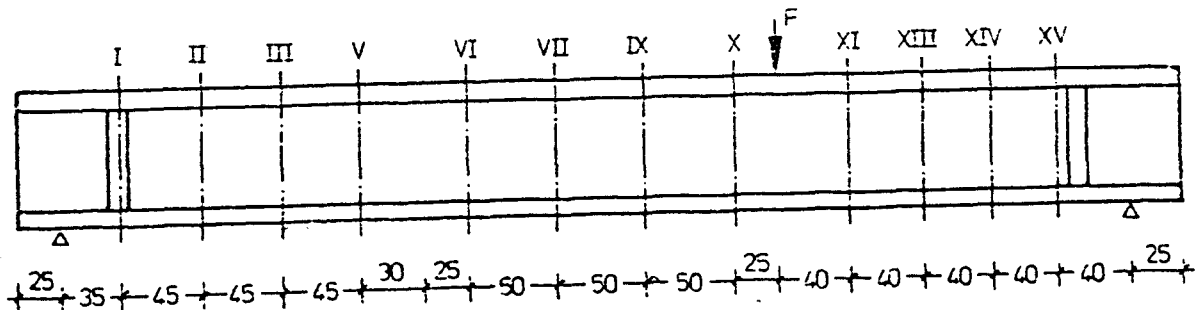
Bügeldehnungen in mm/m $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Anlage A5.8: Bügeldehnungen des Versuchsbalkens Sb 5

1. Laststellung

Bügeldehnungen in mm/m $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

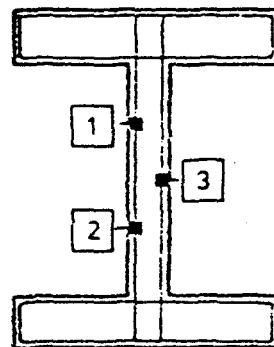
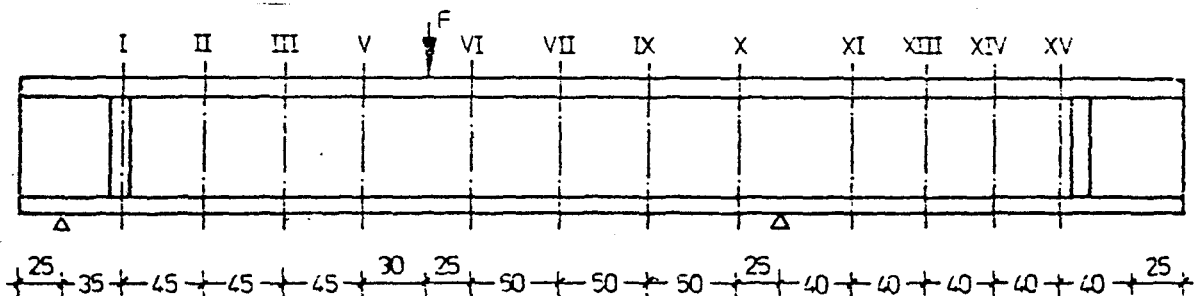
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}														
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947	1.000	0.632
	1														1
MQ1/1	0.279	0.284	0.285	0.289	0.295	0.299	0.300	0.304	0.306	0.308	0.310	0.313	0.319	0.319	0.308
MQ1/2	0.683	0.700	0.727	0.772	0.82	0.876	0.921	0.952	0.980	1.008	1.038	1.065	1.100	1.133	0.986
MQ1/3	0.472	0.485	0.493	0.510	0.539	0.574	0.605	0.625	0.643	0.658	0.675	0.693	0.714	0.734	0.650
MQ2/1	0.552	0.587	0.672	0.804	0.949	1.094	1.216	1.287	1.345	1.404	1.461	1.514	1.572	1.622	1.345
MQ3/1	4.794	4.901	5.051	5.211	5.381	5.561	5.731	5.825	5.918	-	-	-	-	-	5.912
MQ3/2	0.835	0.891	1.027	1.213	1.417	1.626	1.816	1.919	2.012	2.100	2.202	2.283	2.374	2.456	2.027
MQ3/3	2.026	2.039	2.069	2.150	2.304	2.492	2.675	2.781	2.906	3.015	3.151	3.262	3.388	3.512	2.982
MQ5/1	1.594	1.641	1.701	1.784	1.928	2.114	2.303	2.421	2.520	2.628	2.762	2.879	3.013	3.135	2.624
MQ5/2	0.452	0.460	0.481	0.567	0.762	0.959	1.126	1.217	1.382	1.486	1.735	1.868	2.019	2.175	1.744
MQ5/3	0.531	0.536	0.541	0.564	0.634	0.732	0.849	0.941	1.134	1.277	1.812	2.044	2.299	2.574	1.964
MQ6/1	-0.141	-0.130	-0.112	-0.091	-0.039	0.001	0.050	0.088	0.076	0.093	0.725	1.092	1.254	1.383	1.056
MQ6/2	-0.127	-0.112	-0.097	-0.076	-0.058	-0.038	0.000	0.030	0.039	0.069	0.400	0.700	0.878	1.005	0.789
MQ6/3	-0.077	-0.071	-0.063	-0.055	-0.050	-0.042	-0.018	-0.001	0.493	0.737	0.894	1.111	1.335	1.485	1.141
MQ7/1	-0.040	-0.028	-0.018	-0.003	0.009	0.020	0.020	0.025	0.048	0.064	0.255	0.349	0.449	0.538	0.439
MQ7/2	-0.044	-0.032	-0.024	-0.015	-0.006	0.000	0.000	0.001	0.869	1.025	1.292	1.333	1.435	1.552	1.215
MQ7/3	0.008	0.012	0.012	0.013	0.013	0.016	0.070	0.146	1.901	2.220	2.310	2.441	2.626	2.820	1.609
MQ9/1	-0.038	-0.021	-0.008	0.008	0.022	0.032	0.032	0.045	1.027	1.271	1.502	1.673	1.863	2.040	1.291
MQ9/2	-0.053	-0.043	-0.036	-0.028	-0.023	-0.022	0.580	0.770	0.958	1.050	1.167	1.285	1.446	1.600	1.255
MQ9/3	-0.002	0.000	0.000	0.000	-0.007	-0.018	1.246	1.581	1.753	1.974	2.174	2.384	2.657	2.939	1.649
MQ10/1	-0.081	-0.078	-0.077	-0.080	-0.087	-0.094	0.115	0.243	0.379	0.469	0.528	0.639	0.813	0.916	0.724
MQ10/2	-0.047	-0.058	-0.065	-0.075	-0.088	-0.110	0.049	0.104	0.192	0.233	0.282	0.374	0.516	0.589	0.477
MQ10/3	0.055	0.043	0.033	0.019	-0.004	-0.021	0.066	0.088	0.113	0.137	0.166	0.247	0.402	0.709	0.537
MQ11/1	0.416	0.463	0.554	0.645	0.740	0.852	0.943	1.003	1.104	1.730	2.655	3.496	4.670	5.808	4.839
MQ11/2	0.386	0.372	0.455	0.568	0.715	0.890	1.042	1.114	1.184	1.208	1.301	1.418	1.554	1.453	1.155
MQ11/3	0.501	0.501	0.559	0.675	0.780	0.869	0.968	1.038	1.115	1.164	1.199	1.263	1.306	1.062	0.749
MQ13/1	0.578	0.738	1.019	1.276	1.503	1.699	1.865	1.949	2.033	2.161	2.340	2.539	2.854	3.249	2.662
MQ13/2	0.527	0.590	0.760	0.923	1.067	1.197	1.306	1.369	1.431	1.571	1.872	2.243	2.595	2.888	2.319
MQ13/3	1.045	1.158	1.464	1.803	2.105	2.365	2.609	2.750	2.894	3.122	3.866	4.534	5.532	-	5.448
MQ14/1	0.679	0.810	1.050	1.286	1.507	1.705	1.873	1.958	2.040	2.152	2.298	2.480	2.726	2.958	2.467
MQ14/3	0.600	0.735	1.080	1.402	1.700	1.972	2.194	2.300	2.400	2.537	2.671	2.860	3.148	3.488	2.849
MQ15/1	0.345	0.384	0.433	0.479	0.521	0.557	0.587	0.602	0.617	0.640	0.675	0.717	0.781	0.837	0.783
MQ15/2	0.495	0.560	0.718	0.878	1.025	1.134	1.209	1.239	1.269	1.314	1.371	1.440	1.540	1.627	1.494
MQ15/3	0.588	0.671	0.830	1.011	1.199	1.390	1.561	1.653	1.738	1.850	2.000	2.209	2.517	2.842	2.320



Anlage A5.9: Bügeldehnungen des Versuchsbalkens SB 5
2. Laststellung

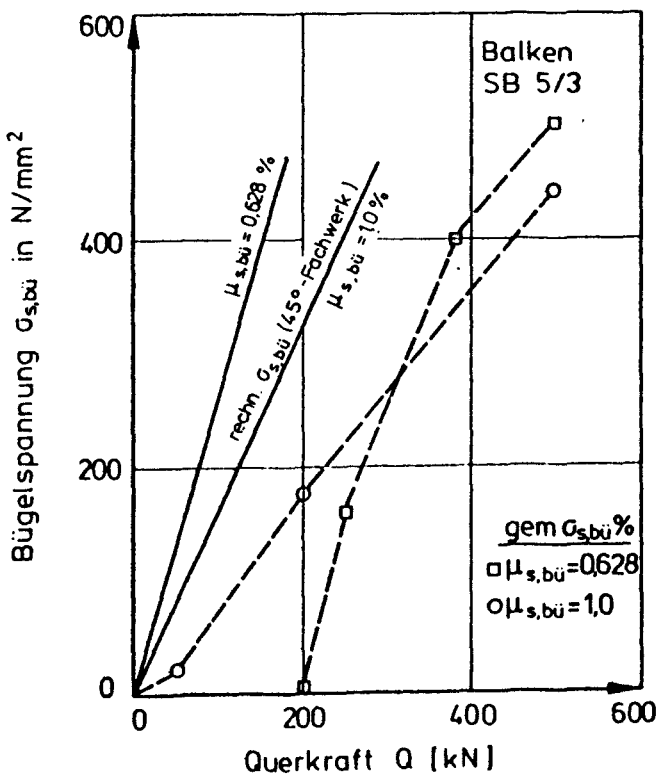
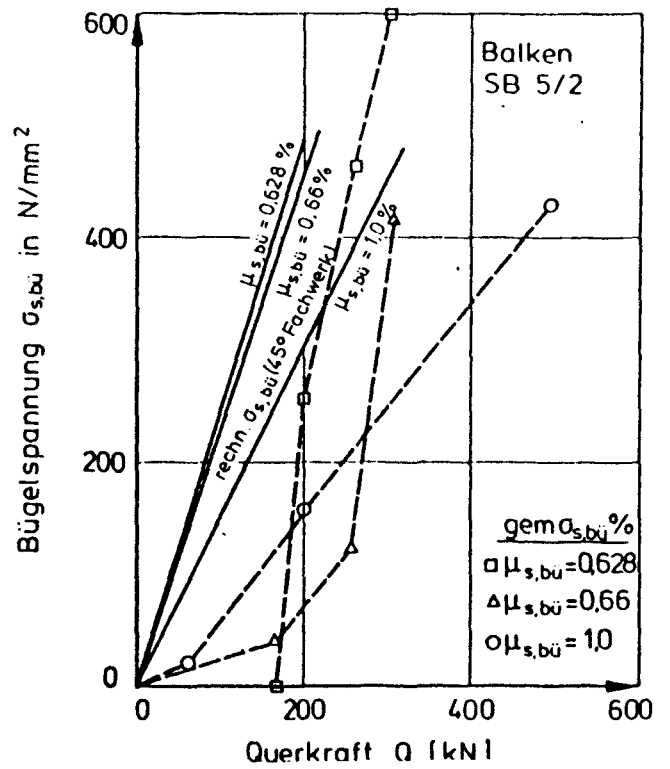
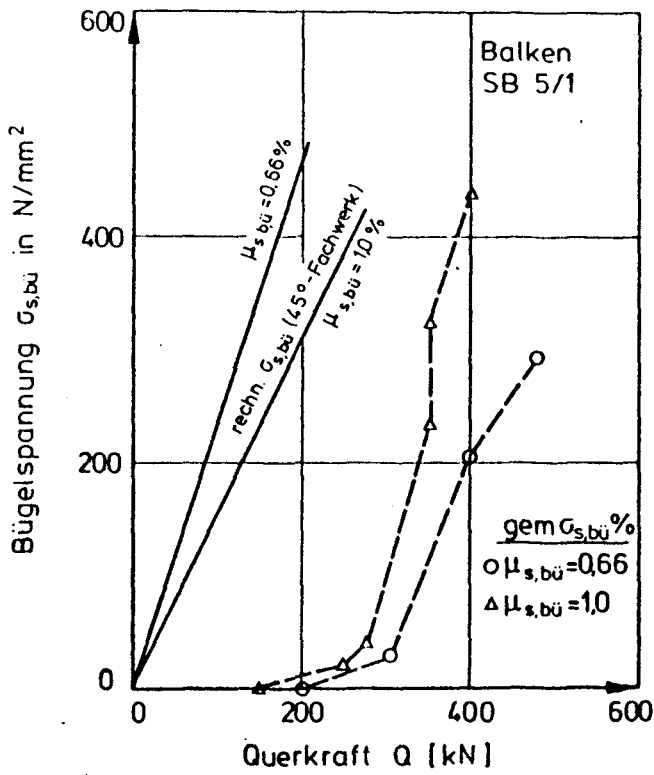
Bügeldehnungen in mm/m $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}														
	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.657	0.707	0.758	0.808	0.859	0.909	0.960	1.000
	1														
MQ1/1	0.275	0.275	0.282	0.286	0.291	0.297	0.303	0.307	0.312	0.318	0.322	0.326	0.330	0.335	0.338
MQ1/2	0.660	0.684	0.746	0.818	0.900	0.983	1.072	1.120	1.168	1.219	1.266	1.315	1.361	1.404	1.414
MQ1/3	0.462	0.475	0.499	0.537	0.591	0.639	0.689	0.715	0.740	0.768	0.793	0.820	0.843	0.868	0.881
MQ2/1	0.525	0.586	0.766	0.966	1.179	1.355	1.509	1.582	1.649	1.720	1.784	1.854	1.909	1.962	1.981
MQ3/1	4.826	4.985	5.183	5.415	5.668	5.912	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MQ3/2	0.865	0.951	1.177	1.454	1.743	1.991	2.220	2.322	2.418	2.509	2.594	2.683	2.767	2.893	3.005
MQ3/3	2.095	2.113	2.187	2.337	2.563	2.812	3.061	3.176	3.274	3.365	3.446	3.539	3.627	3.742	3.796
MQ5/1	1.656	1.623	1.638	1.708	1.851	2.020	2.246	2.375	2.502	2.631	2.772	2.901	3.020	3.141	3.247
MQ5/2	0.891	0.753	0.601	0.491	0.448	0.479	0.544	0.569	0.577	0.568	0.560	0.556	0.556	0.584	0.603
MQ5/3	1.199	1.162	1.113	1.082	1.052	1.032	1.000	0.969	0.956	0.949	0.959	0.982	1.028	1.116	1.191
MQ6/1	0.243	0.132	0.064	0.025	-0.010	0.039	0.040	0.039	0.045	0.052	0.092	0.181	1.385	1.569	1.741
MQ6/2	0.231	0.129	0.050	-0.003	-0.051	-0.042	-0.060	-0.069	-0.064	-0.053	-0.090	-0.098	0.155	0.153	0.183
MQ6/3	0.532	0.506	0.463	0.419	0.379	0.387	0.380	0.378	0.381	0.557	0.780	0.941	0.912	0.956	1.016
MQ7/1	0.250	0.238	0.228	0.233	0.266	1.020	1.518	1.772	1.986	2.163	2.285	2.430	2.664	2.717	2.707
MQ7/2	0.602	0.575	0.542	0.540	0.543	1.739	2.322	2.594	2.820	2.853	2.870	-	-	-	-
MQ7/3	0.514	0.483	0.457	0.462	0.470	1.195	1.439	1.590	1.668	1.691	1.749	1.881	2.340	2.596	2.641
MQ9/1	0.452	0.341	0.275	0.342	0.795	1.283	1.554	1.714	1.851	1.849	1.858	1.885	1.902	1.945	2.090
MQ9/2	0.421	0.370	0.335	0.340	0.340	1.060	1.565	1.788	2.256	3.009	2.952	2.888	2.817	2.884	2.896
MQ9/3	0.389	0.333	0.300	0.283	0.254	2.275	2.627	2.816	2.999	2.842	2.863	2.771	-	-	-
MQ10/1	0.455	0.370	0.195	0.270	0.352	0.391	0.374	0.366	0.358	0.359	0.361	0.358	0.369	0.376	0.380
MQ10/2	0.392	0.347	0.335	0.788	1.105	1.237	1.237	1.271	1.270	1.258	1.224	1.208	1.198	1.187	1.143
MQ10/3	0.317	0.316	0.504	0.789	0.917	0.893	0.939	0.990	1.000	1.032	1.059	1.116	1.253	1.384	1.574



Anlage A5.10: Bügeldehnungen des Versuchsbalkens SB 5

3. Laststellung

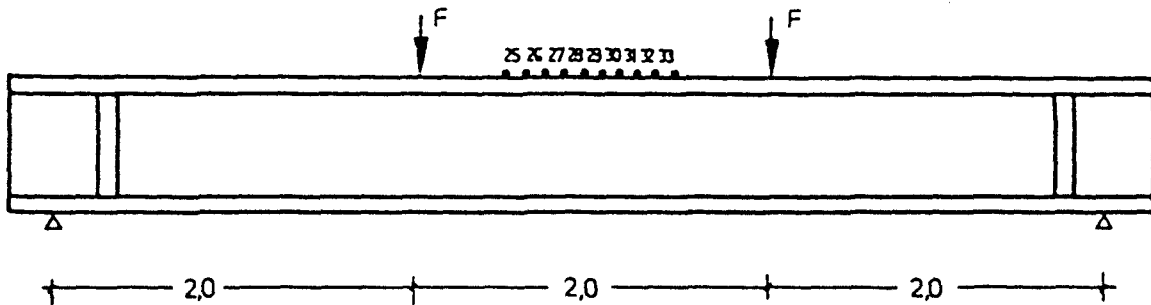


Anlage A5.11: Vergleich der rechnerischen und gemessenen
Bügelspannungen beim Versuchsbalken SB 5

Petonlängsdehnungen in mm/m auf der Balkenoberseite $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Relastungsgrad F/F_{\max}												
	0.000	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	0.296	0.737	0.295
	1								1		1	3	2
MQ7/25	0.055	0.092	-0.199	-0.291	-0.611	-0.574	-0.664	-0.508	-1.174	-0.426	-0.348	-0.755	-0.135
MQ7/26	0.403	0.227	0.048	-0.105	-0.645	-0.320	-0.716	-0.499	-0.982	-0.332	-0.284	-0.849	-0.076
MQ7/27	0.197	-0.071	-0.073	-0.126	-0.648	-0.346	-0.691	-0.414	-0.927	-0.522	-0.357	-0.847	-0.160
MQ8/28	0.288	0.041	0.023	-0.076	-0.430	-0.437	-0.497	-0.570	-0.876	-0.291	-0.316	-0.597	-0.066
MQ8/29	0.350	0.032	0.124	-0.080	-0.458	-0.435	-0.597	-0.654	-0.895	-0.233	-0.416	-0.730	-0.130
MQ8/30	0.341	-0.005	0.089	-0.078	-0.394	-0.156	-0.531	-0.595	-0.815	-0.076	-0.162	-0.579	0.069
MQ9/31	0.551	0.089	0.172	0.094	-0.291	-0.151	-0.570	-0.339	-0.913	-0.364	-0.309	-0.661	0.016
MQ9/32	0.481	0.048	0.108	0.130	-0.332	-0.188	-0.492	-0.435	-0.801	-0.103	-0.295	-0.570	-0.124
MQ9/33	0.311	0.046	0.000	-0.101	-0.364	-0.252	-0.497	-0.446	-0.805	-0.302	-0.332	-0.531	-0.016

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.842	0.000	0.842	0.895	0.947	1.000
	4	3	5	4	6	5	7		3	2			
MQ7/25	-0.632	-0.426	-0.796	-0.467	-0.833	-0.455	-0.867	-1.066	-0.297	-1.146	-1.284	-1.270	-1.453
MQ7/26	-0.593	-0.236	-0.673	-0.330	-0.741	-0.391	-0.682	-0.904	-0.089	-1.082	-1.142	-1.197	-1.357
MQ7/27	-0.558	-0.213	-0.966	-0.501	-0.835	-0.616	-0.895	-1.039	-0.561	-1.135	-1.215	-1.403	-1.437
MQ8/28	-0.554	-0.208	-0.753	-0.355	-0.744	-0.336	-0.712	-0.876	-0.261	-0.982	-1.137	-1.220	-1.213
MQ8/29	-0.700	-0.350	-0.924	-0.396	-0.835	-0.442	-0.865	-1.050	-0.272	-1.185	-1.339	-1.398	-1.437
MQ8/30	-0.476	-0.281	-0.739	-0.211	-0.767	-0.405	-0.764	-0.833	-0.300	-1.080	-1.165	-1.238	-0.927
MQ9/31	-0.442	-0.156	-0.780	-0.236	-0.748	-0.403	-0.588	-0.911	-0.176	-1.057	-1.160	-1.114	-1.034
MQ9/32	-0.419	-0.162	-0.641	-0.281	-0.675	-0.366	-0.641	-0.636	-0.325	-1.055	-0.922	-1.169	-0.986
MQ9/33	-0.419	-0.220	-0.558	-0.304	-0.627	-0.327	-0.650	-0.883	-0.249	-0.995	-1.087	-1.133	-1.002

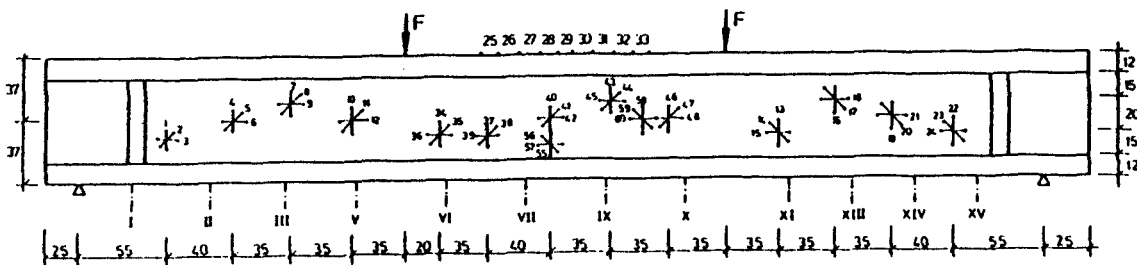


Anlage A5.12: Versuchsbalken SB 5, Stauchungen der Betondruckzone, 1. Laststellung

Betonlängsdehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.000	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	0.296	0.737	0.737
	1								1		1	2	3
MQ3/9	-0.524	-0.584	-0.574	-0.085	-0.400	0.822	1.622	1.712	1.936	1.281	1.176	1.121	2.275
MQ13/18	-0.169	-0.153	-0.178	-0.183	-0.508	-0.551	-0.588	-0.497	-0.732	-0.469	-0.499	-	-0.458
MQ2/6	-0.165	-0.256	-0.254	-0.231	0.043	-0.030	-0.117	-0.400	-0.760	-0.481	-0.458	-0.284	-0.124
MQ5/12	-0.190	-0.176	-0.199	-0.215	-0.432	-0.325	-0.336	-0.030	-0.362	-0.229	-0.286	-0.268	-0.076
MQ14/21	-0.133	-0.185	-0.156	-0.231	-0.526	-0.529	-0.501	-0.579	-0.936	-0.606	-0.595	-	-0.707
MQ1/3	-0.199	-0.265	-0.206	-0.222	-0.465	-0.384	-0.389	-0.506	-0.725	-0.604	-0.554	-0.789	-0.609
MQ11/15	-0.208	-0.176	-0.092	-0.128	-0.311	-0.142	-0.156	-0.185	-0.535	-0.320	-0.332	-0.311	-0.165
MQ15/24	-0.236	-0.247	-0.197	-0.167	-0.453	-0.432	-0.449	-0.535	-0.906	-0.554	-0.549	-	-0.680

	Belastungsgrad F/F_{\max}										
Meßstelle	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.000	0.895	0.947	1.000
	2	4	3	5	4	6	5	3			
MQ3/9	1.439	2.368	1.389	2.153	1.359	2.323	1.497	1.240	3.828	4.542	5.654
MQ13/18	-0.293	-0.503	-0.430	-0.581	-0.478	-0.654	-0.519	-0.522	-0.995	-1.000	-0.927
MQ2/6	-0.281	-0.144	-0.378	-0.222	-0.389	-0.238	-0.362	-0.325	-0.162	-0.204	-0.151
MQ5/12	-0.101	-0.130	-0.236	-0.325	-0.243	-0.311	-0.300	-0.435	-0.563	-0.551	-0.455
MQ14/21	-0.435	-0.657	-0.551	-0.908	-0.604	-0.840	-0.648	-0.645	-1.078	-1.169	-1.089
MQ1/3	-0.396	-0.696	-0.535	-0.789	-0.565	-0.826	-0.654	-0.739	-1.259	-1.371	-1.357
MQ11/15	-0.071	0.350	-0.080	0.300	-0.160	0.453	-0.105	-0.284	1.195	1.405	1.737
MQ15/24	-0.423	-0.629	-0.513	-0.828	-0.600	-0.748	-0.570	-0.627	-1.076	-0.993	-0.966



Anlage A5.13: Versuchsbalken SB 5, Betondehnungen im Steg,
1. Laststellung

Betonquerdehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.000	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	0.296	0.737	0.737
	1								1		1	2	3
MQ3/7	-0.195	0.080	0.188	0.014	0.005	1.551	2.471	2.689	2.751	1.950	1.973	3.007	3.341
MQ13/16	0.373	0.142	0.130	0.462	-0.302	1.137	1.352	1.469	1.553	1.162	0.812	- - -	1.984
MQ2/4	0.190	0.133	0.144	0.153	1.714	3.586	4.291	4.503	5.350	3.808	3.449	5.384	5.572
MQ5/10	0.172	0.130	0.172	0.206	0.039	0.201	0.119	2.030	2.176	1.503	1.366	2.455	2.602
MQ14/19	0.078	0.087	0.098	0.114	-0.153	1.140	1.387	1.535	1.465	0.977	0.938	- - -	1.787
MQ1/1	0.089	0.002	0.005	-0.023	-0.126	0.021	0.087	0.165	-0.080	-0.119	-0.149	-0.217	-0.046
MQ11/13	0.078	0.302	0.114	0.114	-0.032	0.124	0.190	0.178	-0.021	0.059	0.114	0.043	0.247
MQ15/22	0.341	0.384	0.346	0.277	0.160	0.220	0.261	0.343	0.007	0.190	0.169	- - -	0.270

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}										
	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.000	0.895	0.947	1.000
	2	4	3	5	4	6	5	3			
MQ3/7	2.192	3.368	2.259	3.435	2.416	3.460	2.174	2.183	5.449	- - -	- - -
MQ13/16	1.108	1.982	1.082	1.918	1.133	1.789	1.291	0.961	2.405	2.572	2.620
MQ2/4	3.730	5.572	3.753	5.549	3.831	5.686	4.059	4.481	- - -	- - -	- - -
MQ5/10	1.396	2.593	1.522	2.453	1.547	2.547	1.712	1.410	3.064	3.082	3.318
MQ14/19	1.053	1.803	1.043	1.686	1.076	1.675	1.057	0.632	2.046	2.192	2.428
MQ1/1	-0.023	-0.016	-0.096	-0.169	-0.197	-0.181	-0.199	-0.263	-0.309	-0.275	-0.172
MQ11/13	0.677	1.064	0.620	1.080	0.659	1.188	0.776	0.725	1.632	1.815	2.046
MQ15/22	0.323	0.220	0.206	0.071	0.082	0.062	0.124	0.066	0.082	0.162	0.352

Betontrajektoriendehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

	Belastungsgrad F/F_{\max}												
Meßstelle	0.000	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	0.296	0.737	0.737
	1								1		1	2	3
MQ3/8	-0.021	-0.105	-0.092	-0.169	-0.451	-0.215	-0.272	-0.311	-0.723	-0.352	-0.227	-0.535	-0.281
MQ13/17	-0.117	-0.238	-0.233	-0.277	-0.570	-0.547	-0.620	-0.696	-1.041	-0.602	-0.606	- - -	-0.707
MQ2/5	-0.048	-0.153	-0.201	-0.231	-0.327	-0.272	-0.341	-0.469	-0.611	-0.609	-0.481	-0.703	-0.499
MQ5/11	-0.014	-0.156	-0.227	-0.195	-0.465	-0.350	-0.467	-0.215	-0.771	-0.382	-0.407	-0.636	-0.414
MQ14/20	0.073	-0.048	-0.275	-0.078	-0.275	-0.405	-0.316	-0.487	-0.835	-0.471	-0.627	- - -	-0.673
MQ1/2	-0.181	-0.263	-0.291	-0.325	-0.565	-0.513	-0.604	-0.645	-0.938	-0.728	-0.739	-1.057	-0.870
MQ11/14	-0.119	-0.137	-0.094	-0.368	-0.478	-0.481	-0.362	-0.508	-0.789	-0.423	-0.535	-0.693	-0.462
MQ15/23	0.007	-0.078	-0.121	-0.092	-0.362	-0.439	-0.442	-0.517	-0.934	-0.506	-0.538	- - -	-0.643

	Belastungsgrad F/F_{\max}										
Meßstelle	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.000	0.895	0.947	1.000
	2	4	3	5	4	6	5	3			
MQ3/8	-0.076	-0.252	-0.151	-0.492	-0.195	-0.442	-0.325	-0.055	-0.330	0.005	0.730
MQ13/17	-0.426	-0.707	-0.572	-0.840	-0.652	-0.911	-0.682	-0.634	-1.233	-1.309	-1.293
MQ2/5	-0.332	-0.499	-0.465	-0.616	-0.476	-0.670	-0.535	-0.368	-0.915	-0.952	-0.897
MQ5/11	-0.204	-0.503	-0.371	-0.654	-0.403	-0.728	-0.419	-0.522	-1.133	-1.174	-1.119
MQ14/20	-0.458	-0.609	-0.574	-0.783	-0.581	-0.826	-0.522	-0.556	-0.993	-1.085	-0.986
MQ1/2	-0.565	-0.920	-0.693	-1.037	-0.778	-1.085	-0.840	-0.847	-1.538	-1.579	-1.629
MQ11/14	-0.149	-0.641	-0.524	-0.938	-0.423	-0.794	-0.474	-0.357	-1.057	-1.050	-1.050
MQ15/23	-0.384	-0.698	-0.581	-1.092	-0.606	-0.886	-0.627	-0.449	-1.041	-1.101	-1.153

Anlage A5.14: Versuchsbalken SB 5, Betondehnungen im Steg,

1. Laststellung

Hauptdehnungen des Betons $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

1. Zeile = Epsilon max in mm/m

2. Zeile = Epsilon min in mm/m

3. Zeile = Winkel zwischen Epsilon min und der Längsachse in Grad

		Belastungsgrad F/F_{\max} in Altgrad												
Schnitt	Lage	0.000	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295	0.296	0.737	0.737
		1								1		1	2	3
1	HI UN	0.136	0.056	0.117	0.103	0.023	0.207	0.361	0.411	0.223	0.078	0.086	0.120	0.284
		-0.246	-0.319	-0.318	-0.348	-0.614	-0.570	-0.663	-0.752	-1.028	-0.801	-0.789	-1.126	-0.939
		20.593	22.284	30.511	31.916	28.916	29.290	31.142	27.369	29.471	28.254	31.205	31.348	31.288
2	HI MI	0.200	0.153	0.192	0.233	2.345	4.511	5.366	5.568	6.511	4.788	4.274	6.864	7.025
		-0.175	-0.276	-0.302	-0.311	-0.588	-0.955	-1.192	-1.465	-1.921	-1.461	-1.283	-1.764	-1.577
		9.411	12.597	18.133	22.500	27.638	24.295	23.884	22.898	21.784	23.330	22.668	24.469	24.267
3	HI OB	0.017	0.111	0.201	0.107	0.127	2.635	4.404	4.759	5.437	3.611	3.420	5.695	5.943
		-0.736	-0.615	-0.587	-0.178	-0.522	-0.262	-0.311	-0.358	-0.750	-0.380	-0.271	-0.567	-0.327
		-32.041	-11.941	-7.424	34.828	25.691	37.711	39.812	39.497	41.215	40.176	38.763	40.932	40.105
4	HI MI	0.172	0.180	0.269	0.279	0.161	0.328	0.316	2.593	3.011	1.974	1.797	3.295	3.409
		-0.190	-0.226	-0.296	-0.288	-0.554	-0.452	-0.533	-0.593	-1.197	-0.700	-0.717	-1.108	-0.883
		0.791	20.500	24.507	21.072	24.373	23.799	28.801	24.855	26.451	24.820	24.452	25.895	25.697
5	HI UN	0.088	0.375	0.158	0.374	0.165	0.481	0.434	0.533	0.294	0.218	0.372	0.452	0.585
		-0.218	-0.249	-0.136	-0.388	-0.508	-0.499	-0.400	-0.540	-0.850	-0.479	-0.590	-0.720	-0.503
		10.344	19.962	22.775	35.735	32.764	37.132	32.732	35.107	31.650	28.531	31.185	36.215	33.864
6	HI OB	0.450	0.270	0.236	0.666	-0.210	1.484	1.777	2.023	2.198	1.597	1.162	- - -	2.674
		-0.246	-0.281	-0.284	-0.387	-0.600	-0.898	-1.013	-1.051	-1.427	-0.904	-0.849	- - -	-1.148
		19.471	28.804	26.808	26.125	29.013	22.432	22.965	25.126	25.963	24.656	24.658	- - -	25.143
7	HI MI	0.118	0.087	0.248	0.115	-0.142	1.401	1.654	1.909	1.892	1.214	1.278	- - -	2.280
		-0.173	-0.185	-0.306	-0.232	-0.537	-0.790	-0.768	-0.953	-1.363	-0.843	-0.935	- - -	-1.200
		-21.805	-0.211	31.347	3.225	-9.539	20.206	19.400	21.197	21.243	19.837	23.086	- - -	22.104
8	HI UN	0.345	0.416	0.409	0.321	0.228	0.360	0.403	0.512	0.216	0.311	0.310	- - -	0.441
		-0.240	-0.279	-0.260	-0.211	-0.521	-0.572	-0.591	-0.704	-1.115	-0.675	-0.690	- - -	-0.851
		4.481	12.454	17.878	16.756	17.556	22.804	22.215	21.900	23.352	20.527	22.054	- - -	21.340

Schnitt	Lage	Belastungsgrad F/F_{\max}											
		0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.000	0.895	0.947	1.000	
		2	4	3	5	4	6	5	3				
1	HI UN	0.192	0.303	0.121	0.159	0.057	0.161	0.045	-0.081	0.107	0.111	0.284	
		-0.611	-1.015	-0.752	-1.117	-0.819	-1.168	-0.898	-0.921	-1.675	-1.757	-1.813	
		31.159	29.458	29.912	30.473	32.567	30.494	30.591	27.739	28.895	27.031	27.787	
2	HI MI	4.597	7.014	4.671	7.032	4.767	7.229	5.099	5.507	- - -	- - -	- - -	
		-1.148	-1.586	-1.296	-1.705	-1.325	-1.781	-1.402	-1.351	- - -	- - -	- - -	
		22.860	24.173	23.091	24.328	23.079	24.444	23.578	22.754	- - -	- - -	- - -	
3	HI OB	3.744	6.028	3.846	6.142	4.036	6.273	4.022	3.540	9.673	- - -	- - -	
		-0.113	-0.292	-0.198	-0.554	-0.261	-0.490	-0.351	-0.117	-0.396	- - -	- - -	
		39.371	40.448	38.789	39.481	37.880	40.161	40.548	37.528	40.368	- - -	- - -	
4	HI MI	1.781	3.437	1.985	3.273	2.035	3.452	2.215	1.855	4.245	4.307	4.604	
		-0.486	-0.974	-0.699	-1.145	-0.731	-1.216	-0.803	-0.880	-1.744	-1.776	-1.741	
		24.342	25.935	24.540	25.522	24.845	26.128	24.098	23.789	26.367	26.664	26.756	
5	HI UN	0.890	2.101	1.138	2.364	1.037	2.476	1.257	0.987	3.894	4.278	4.837	
		-0.284	-0.687	-0.598	-0.984	-0.538	-0.835	-0.586	-0.546	-1.067	-1.058	-1.054	
		25.197	37.583	33.106	38.264	29.331	38.588	30.723	24.430	42.473	42.797	43.497	
6	HI OB	1.496	2.646	1.500	2.627	1.596	2.485	1.786	1.350	3.283	3.539	3.625	
		-0.681	-1.167	-0.848	-1.290	-0.941	-1.350	-1.014	-0.911	-1.873	-1.967	-1.932	
		24.978	24.669	24.953	25.182	25.284	25.219	24.861	24.508	24.371	24.776	25.172	
7	HI MI	1.378	2.279	1.390	2.137	1.408	2.186	1.325	0.836	2.634	2.829	3.085	
		-0.760	-1.133	-0.898	-1.359	-0.936	-1.351	-0.916	-0.849	-1.666	-1.806	-1.746	
		22.936	21.930	22.907	21.051	22.102	22.340	20.219	20.358	21.699	21.766	21.636	
8	HI UN	0.451	0.446	0.405	0.465	0.228	0.334	0.310	0.105	0.297	0.481	0.765	
		-0.551	-0.855	-0.712	-1.222	-0.746	-1.020	-0.756	-0.666	-1.291	-1.312	-1.379	
		20.921	24.649	24.969	28.895	22.750	26.641	24.670	12.967	21.607	24.944	26.041	

Anlage A5.15: Versuchsbalken SB 5, Hauptdehnungen des Betons, 1. Laststellung

Betonlängsdehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

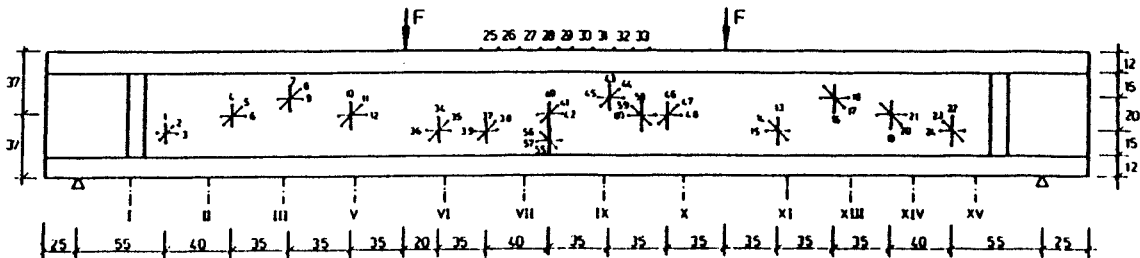
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}											
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947
	1											
MQ9/45	-0.211	-0.243	-0.277	-0.339	-0.423	-0.336	-0.384	-0.547	-0.618	-0.700	-0.741	-0.709
MQ8/42	-0.377	-0.407	-0.391	-0.435	-0.476	-0.414	-0.423	1.362	1.769	2.215	2.471	2.952
MQ10/48	-0.368	-0.405	-0.444	-0.462	-0.478	-0.378	0.835	1.426	1.650	2.629	2.822	3.970
MQ14/21	-0.606	-0.595	-0.723	-0.780	-0.936	-1.000	-0.995	-1.158	-1.222	-1.304	-1.430	-1.478
MQ1/3	-0.712	-0.725	-0.783	-0.858	-0.982	-0.989	-1.034	-1.080	-1.080	-1.158	-1.165	-1.167
MQ6/36	-0.396	-0.398	-0.352	-0.355	-0.380	-0.357	-0.323	-0.455	-0.467	-0.538	-0.503	-0.517
MQ7/39	-0.444	-0.407	-0.355	-0.391	-0.407	-0.359	-0.350	-0.522	-0.675	-0.620	-0.677	-0.648

Betonquerdrehung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}											
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947
	1											
MQ9/43	0.025	-0.005	0.027	0.094	0.007	-0.002	-0.268	-0.025	-0.128	-0.009	-0.247	-0.169
MQ8/40	0.071	0.043	0.076	0.039	0.057	0.027	0.098	2.677	3.160	3.721	4.018	4.400
MQ10/46	-0.073	-0.094	-0.076	-0.073	-0.098	-0.089	1.400	2.002	2.110	2.336	2.677	3.178
MQ14/19	0.744	0.828	1.167	1.497	1.641	1.913	2.140	2.359	2.595	3.011	3.497	4.249
MQ1/1	-0.247	-0.217	-0.206	-0.215	-0.341	-0.201	-0.188	-0.224	-0.236	-0.295	-0.252	-0.247
MQ6/34	0.023	0.030	0.050	0.092	-0.043	0.092	0.057	0.098	0.048	0.053	0.034	0.098
MQ7/37	-0.064	-0.071	-0.016	-0.005	-0.073	-0.005	0.142	0.572	0.876	1.636	1.911	2.197

Betontrajektorienendrehung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}											
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947
	1											
MQ9/44	-0.124	-0.181	-0.213	-0.261	-0.357	-0.357	-0.423	-0.549	-0.627	-0.721	-0.815	-0.828
MQ8/41	-0.451	-0.453	-0.478	-0.563	-0.629	-0.556	-0.588	-0.407	-0.469	-0.641	-0.735	-0.991
MQ10/47	-0.206	-0.231	-0.213	-0.261	-0.387	-0.291	-0.087	-0.135	-0.213	0.410	-	-
MQ14/20	-0.529	-0.693	-0.590	-0.854	-0.915	-0.975	-1.206	-1.119	-1.476	-1.206	-1.302	-1.432
MQ1/2	-0.849	-0.904	-0.961	-1.016	-1.096	-	-1.160	-1.320	-1.311	-1.394	-1.357	-1.403
MQ6/35	-0.195	-0.213	-0.220	-0.291	-0.343	-0.311	-0.291	-0.384	-0.451	-0.481	-0.513	-0.588
MQ7/38	-0.233	-0.224	-0.220	-0.254	-0.320	-0.236	-0.233	-0.121	-0.085	-0.648	-	-



Anlage A5.16: Versuchsbalken SB 5, Betondehnungen im Steg, 2. Laststellung

Hauptdehnungen des Betons $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$ 1. Zeile = Epsilon max in mm/m
2. Zeile = Epsilon min in mm/m
3. Zeile = Winkel zwischen Epsilon min und der Längsachse in Altgrad

SCHNITT	LAGE	Belastungsgrad F/F_{\max}											
		0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947
		1											
1	HI UN	-0.043	0.031	0.054	0.041	-0.122	- - -	0.082	0.141	0.119	0.068	0.085	0.127
		-0.916	-0.973	-1.043	-1.114	-1.201	- - -	-1.304	-1.445	-1.435	-1.521	-1.502	-1.541
		28.910	29.802	29.133	28.079	26.793	- - -	26.193	28.676	28.564	28.560	27.429	28.269
2	HI UN	0.023	0.032	0.062	0.143	0.002	0.154	0.114	0.166	0.144	0.137	0.152	0.278
		-0.396	-0.400	-0.364	-0.406	-0.425	-0.419	-0.380	-0.523	-0.563	-0.622	-0.621	-0.697
		1.162	3.859	9.473	17.757	18.985	19.244	19.873	18.310	21.582	19.454	23.024	25.454
3	HI UN	-0.063	-0.070	-0.013	0.003	-0.055	0.003	0.174	0.591	0.898	2.123	- - -	- - -
		-0.445	-0.408	-0.358	-0.399	-0.425	-0.367	-0.382	-0.541	-0.697	-1.107	- - -	- - -
		-3.154	-2.551	5.752	8.090	12.798	8.483	13.836	7.472	6.726	22.851	- - -	- - -
4	HI MI	0.208	0.170	0.239	0.237	0.287	0.231	0.336	4.534	5.479	6.655	7.298	8.399
		-0.535	-0.534	-0.554	-0.633	-0.706	-0.618	-0.661	-0.495	-0.550	-0.719	-0.809	-1.047
		25.399	25.149	26.962	28.502	28.786	29.344	29.262	37.419	38.331	39.107	39.500	40.591
5	HI OB	0.029	0.008	0.051	0.135	0.054	0.082	-0.213	0.085	-0.020	0.149	-0.089	0.035
		-0.215	-0.256	-0.301	-0.380	-0.470	-0.420	-0.439	-0.657	-0.726	-0.858	-0.899	-0.913
		7.360	12.797	15.034	16.304	17.361	24.193	29.562	22.609	23.017	23.345	26.211	27.618
6	HI MI	-0.072	-0.093	-0.070	-0.073	-0.074	-0.078	2.355	3.585	3.986	4.560	- - -	- - -
		-0.369	-0.406	-0.450	-0.462	-0.502	-0.389	-0.120	-0.157	-0.226	0.405	- - -	- - -
		-2.807	-3.392	-7.164	-0.957	13.761	10.849	38.400	40.573	41.864	47.022	- - -	- - -
7	HI MI	0.971	1.194	1.468	2.022	2.160	2.499	2.943	3.060	3.571	3.836	4.428	5.403
		-0.833	-0.961	-1.024	-1.305	-1.455	-1.586	-1.798	-1.859	-2.198	-2.129	-2.361	-2.632
		20.769	24.343	20.336	23.401	22.265	22.252	24.304	22.179	24.285	21.834	21.736	22.268

Anlage A5.17: Versuchsbalken SB 5, Hauptdehnungen des Betons, 2. Laststellung

Betonlängsdehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

Belastungsgrad F/F_{\max}

Meßstelle	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.707	0.808
1									
MQ9/45	-0.279	-0.146	-0.092	-0.224	-0.158	-0.192	-0.240	-0.270	-0.384
MQ7/54	0.000	-0.018	0.025	0.011	0.000	-0.126	-0.149	-0.208	-0.297
MQ10/60	0.000	0.082	0.732	3.453	5.208	5.785	-	-	-
MQ1/3	-0.730	-0.776	-0.817	-0.899	-0.998	-1.055	-1.133	-1.204	-1.265
MQ6/36	-0.378	-0.378	-0.378	-0.327	-0.330	-0.222	-0.284	-0.238	0.384
MQ8/57	0.000	-0.002	0.114	0.080	0.021	1.650	2.616	4.492	-

Betonquerdrehung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

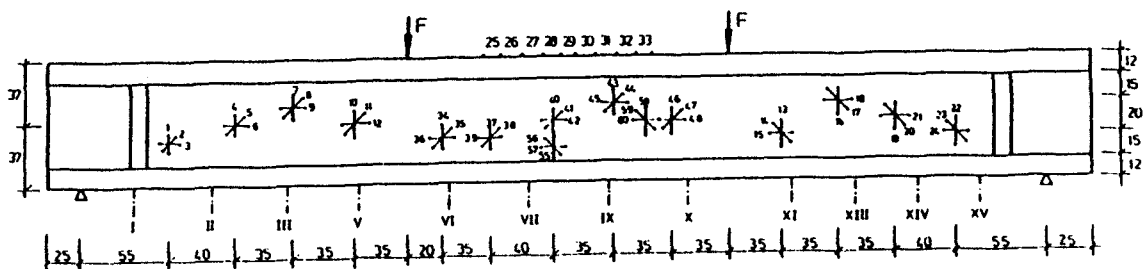
Belastungsgrad F/F_{\max}

Meßstelle	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.707	0.808
1									
MQ9/43	-0.394	-0.140	-0.256	-0.066	-0.110	0.293	0.291	0.236	0.231
MQ10/58	0.000	0.117	0.092	0.023	0.124	0.208	0.043	0.162	0.174
MQ1/1	-0.249	-0.240	-0.174	-0.222	-0.224	-0.183	-0.195	-0.224	-0.158
MQ6/34	-0.027	-0.034	-0.016	0.000	-0.062	0.021	0.014	-0.039	0.593
MQ8/55	0.000	0.098	0.201	0.167	0.236	2.936	4.597	-	-

Betontrajektoriendehnung in mm/m im Stegbereich $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

Belastungsgrad F/F_{\max}

Meßstelle	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.707	0.808
1									
MQ9/44	-0.302	-0.204	-0.023	-0.023	0.165	0.284	0.368	0.421	0.428
MQ7/53	0.000	-0.025	0.057	0.192	0.080	-0.211	-0.233	-0.185	-0.412
MQ10/59	0.000	0.078	0.066	-0.215	-0.197	-0.284	-0.300	-0.389	-0.586
MQ1/2	-0.849	-0.954	-0.989	-1.094	-1.172	-1.231	-1.325	-1.426	-1.517
MQ6/35	-0.314	-0.268	-0.201	-0.153	-0.144	-0.066	-0.064	-0.043	0.792
MQ8/56	0.000	-0.087	-0.009	0.135	-0.016	-	-	-	-



Anlage A5.18: Versuchsbalken SB 5, Betondehnungen im Steg, 3. Laststufe

Hauptdehnungen des Betons $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

1. Zeile = Epsilon max in mm/m

2. Zeile = Epsilon min in mm/m

3. Zeile = Winkel zwischen Epsilon min und der Längsachse in Grad

Schnitt	Lage	Belastungsgrad F/F_{\max}								
		0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.707	0.808
		1								
1	HI UN	-0.057	0.012	0.093	0.071	0.071	0.132	0.146	0.150	0.266
		-0.922	-1.028	-1.084	-1.192	-1.293	-1.370	-1.474	-1.578	-1.689
		28.109	29.499	28.458	28.803	27.700	27.267	27.322	27.732	27.753
2	HI UN	0.005	-0.023	-0.016	0.000	-0.052	0.026	0.030	-0.001	0.809
		-0.410	-0.389	-0.378	-0.327	-0.340	-0.227	-0.300	-0.276	0.168
		16.214	9.911	0.633	-1.837	-10.605	-7.926	-12.739	-21.912	-35.500
4	HI UN	0.000	0.192	0.330	0.168	0.309	-	-	-	-
		0.000	-0.096	-0.015	0.079	-0.052	-	-	-	-
		-45.000	34.838	37.679	-7.404	26.676	-	-	-	-
5	HI OB	-0.269	-0.082	-0.002	0.000	0.166	0.387	0.459	0.489	0.514
		-0.404	-0.204	-0.346	-0.290	-0.434	-0.286	-0.408	-0.523	-0.667
		-74.518	43.592	-59.252	-28.538	-42.705	-21.958	-26.109	-29.994	-29.319
6	HI MI	0.000	0.127	0.883	4.337	6.495	7.302	-	-	-
		0.000	0.072	-0.059	-0.861	-1.163	-1.309	-	-	-
		-45.000	25.428	66.382	65.644	65.801	65.183	-	-	-

Anlage A5.19: Versuchsbalken SB 5, Hauptdehnungen des Betons, 3. Laststufe

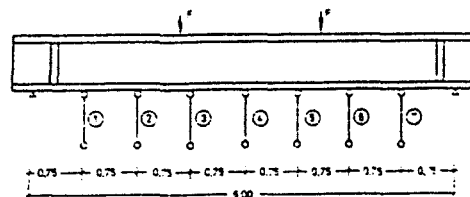
Durchbiegung in mm $F_{\max} = 475.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.000	0.211	0.316	0.421	0.474	0.526	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737	0.737	0.295
	1						1					1	
1	-1.930	-0.505	0.035	0.620	0.945	1.355	1.515	1.840	2.170	2.575	3.055	3.975	1.685
2	-3.335	-1.295	-0.395	0.575	1.120	1.855	2.160	2.740	3.360	4.130	5.170	6.995	2.825
3	-4.155	-1.715	-0.580	0.625	1.290	2.140	2.535	3.245	4.015	4.975	6.205	8.380	3.215
4	-4.460	-1.920	-0.715	0.555	1.255	2.120	2.530	3.280	4.080	5.090	6.320	8.515	3.155
5	-3.305	-0.915	0.220	1.445	2.125	2.930	3.305	4.040	4.815	5.785	6.950	9.005	3.940
6	-2.055	-0.095	0.810	1.785	2.320	2.980	3.310	3.920	4.550	5.325	6.235	7.855	3.825
7	-1.025	0.265	0.835	1.430	1.740	2.160	2.335	2.660	3.005	3.415	3.895	4.745	2.460

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.000	0.296	0.737	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.737	0.295	0.379	0.737
	2	1	2	3	2	4	3	5	4	6	5		7
1	-0.550	1.510	4.140	4.175	1.515	4.145	1.670	4.220	1.860	4.445	1.935	2.390	4.520
2	-0.815	2.465	7.305	7.380	2.465	7.325	2.795	7.505	3.150	7.920	3.305	4.115	8.080
3	-1.160	2.770	8.780	8.855	2.790	8.815	3.210	9.045	3.560	9.495	3.790	4.790	9.740
4	-1.370	2.705	8.920	9.020	2.705	8.965	3.145	9.225	3.480	9.645	3.735	4.755	9.910
5	-0.380	3.475	9.340	9.355	3.430	9.410	3.910	9.660	4.270	10.110	4.475	5.450	10.335
6	0.275	3.460	8.130	8.200	3.500	8.195	3.820	8.375	4.120	8.725	4.300	5.085	8.900
7	0.270	2.290	4.895	4.935	2.305	4.905	2.485	5.000	2.640	5.185	2.730	3.180	5.270

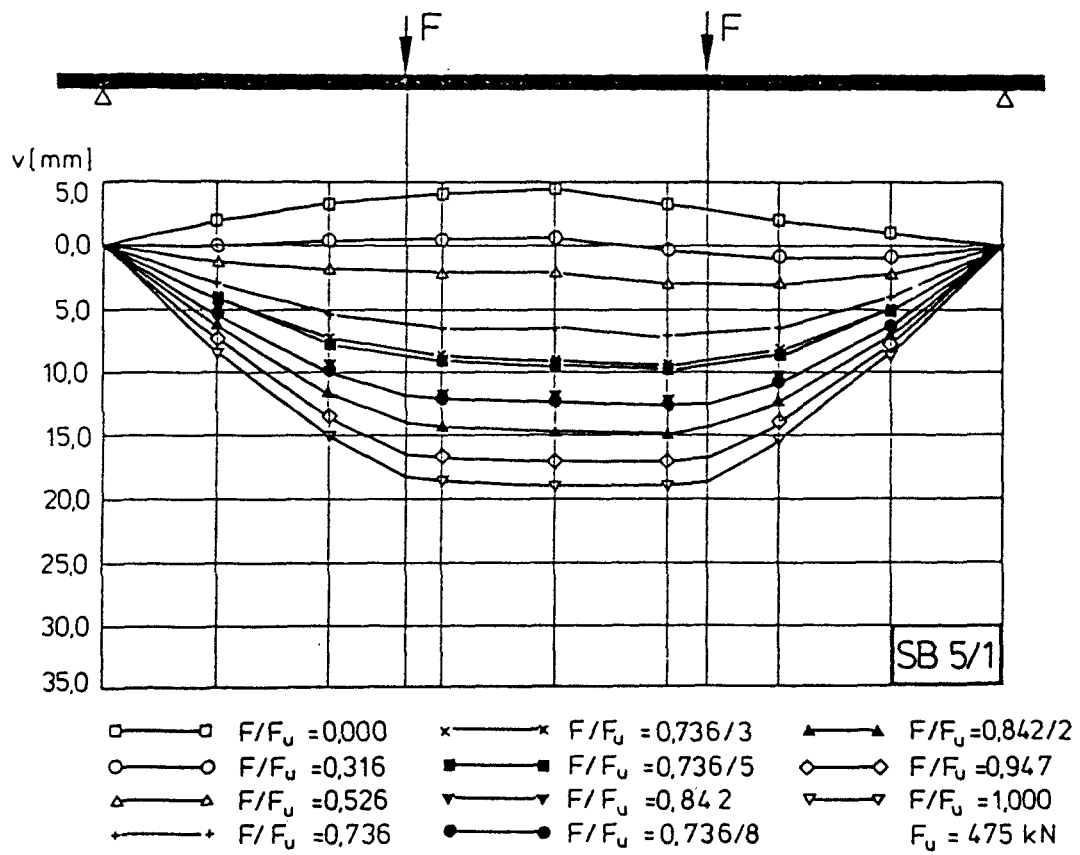
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}												
	0.789	0.842	0.000	0.211	0.316	0.379	0.421	0.474	0.526	0.579	0.632	0.684	0.737
			3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	8
1	4.910	5.445	0.335	1.850	2.535	2.945	3.220	3.550	3.895	4.270	4.660	5.075	5.495
2	8.840	9.860	0.855	3.235	4.405	5.135	5.645	6.245	6.870	7.580	8.325	9.120	9.920
3	10.685	11.995	0.900	3.735	5.135	6.005	6.605	7.340	8.110	9.010	9.975	11.010	12.060
4	10.910	12.275	0.715	3.655	5.115	6.010	6.630	7.395	8.185	9.120	10.125	11.215	12.315
5	11.280	12.560	1.575	4.255	5.690	6.550	7.145	7.875	8.630	9.500	10.445	11.535	12.570
6	9.630	10.575	1.850	4.160	5.300	5.995	6.470	7.040	7.630	8.310	9.030	9.795	10.575
7	5.660	6.165	1.125	2.600	3.255	3.655	3.930	4.250	4.575	4.945	5.325	5.730	6.145

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}						
	0.789	0.842	0.842	0.895	0.947	0.974	1.000
	1	1	2				
1	5.895	6.260	6.390	6.795	7.380	7.845	8.220
2	10.690	11.395	11.625	12.415	13.480	14.345	15.005
3	13.050	13.970	14.275	15.260	16.615	17.690	18.505
4	13.360	14.325	14.605	15.635	17.025	18.125	18.965
5	13.565	14.470	14.730	15.690	16.965	18.000	18.795
6	11.310	11.990	12.190	12.910	13.855	14.650	15.215
7	6.530	6.885	6.985	7.355	7.855	8.240	8.525



Anlage A5.20: Durchbiegungen des Versuchsbalkens SB 5,

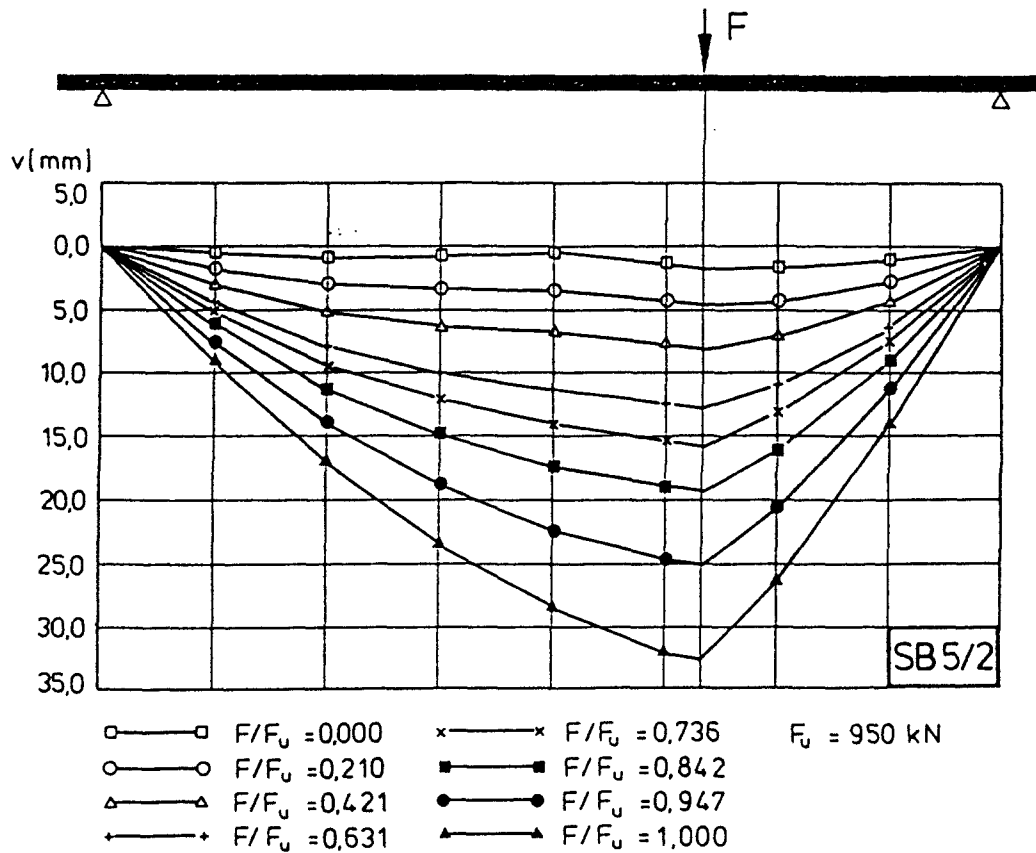
1. Laststellung



Anlage A5.21: Durchbiegungen des Versuchsbalkens SB 5,
1. Laststellung

Durchbiegung in mm/m $F_{\max} = 950.0 \text{ kN}$

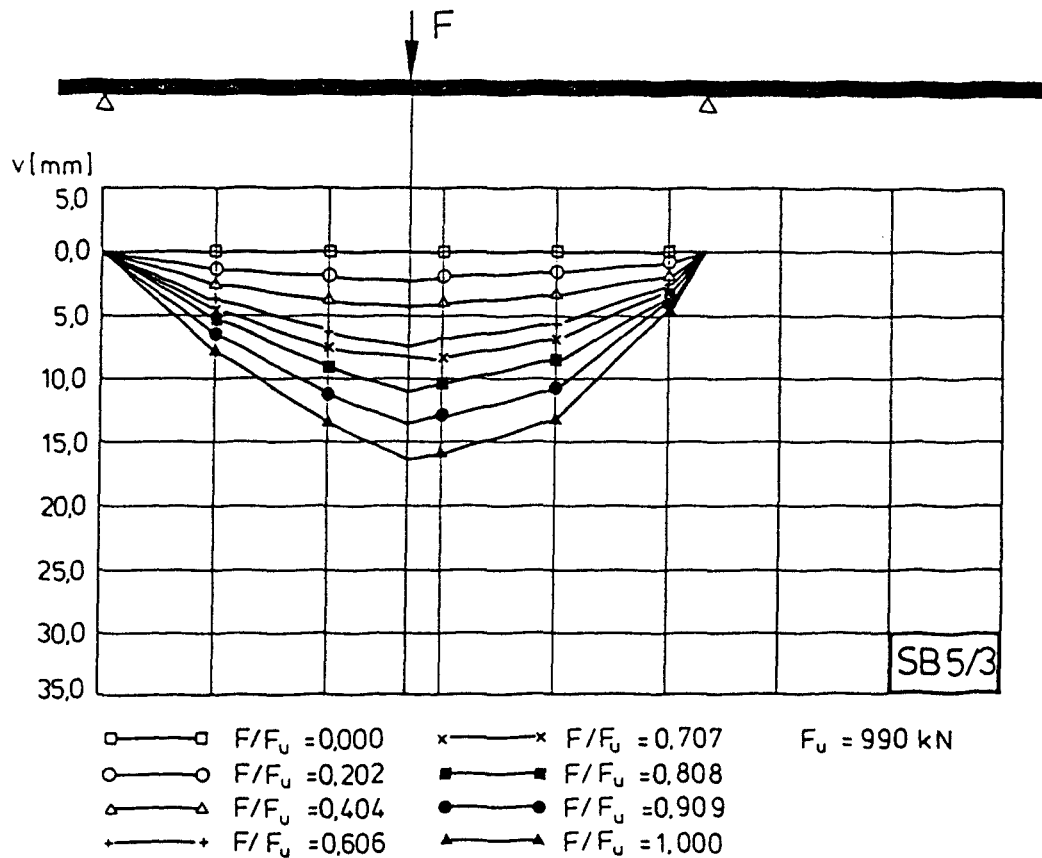
Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}													
	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.684	0.737	0.789	0.842	0.895	0.947	1.000
	1													
1	0.450	1.150	1.785	2.405	3.005	3.725	4.425	4.815	5.180	5.605	6.080	6.650	7.435	8.980
2	0.870	1.935	3.010	4.095	5.225	6.565	7.905	8.655	9.355	10.170	11.140	12.265	13.825	16.875
3	0.690	2.015	3.380	4.785	6.270	8.070	9.890	10.920	12.015	13.170	14.710	16.435	18.745	23.325
4	0.440	1.910	3.445	5.030	6.675	8.745	11.035	12.290	13.820	15.300	17.185	19.355	22.290	28.285
5	1.275	2.705	4.275	5.895	7.595	9.770	12.330	13.640	15.200	16.785	18.845	21.305	24.700	31.900
6	1.620	2.940	4.275	5.635	7.060	8.825	10.765	11.800	12.950	14.210	15.875	17.850	20.580	26.125
7	0.985	1.880	2.695	3.485	4.280	5.230	6.255	6.790	7.390	8.025	8.825	9.820	11.140	13.865
	1													



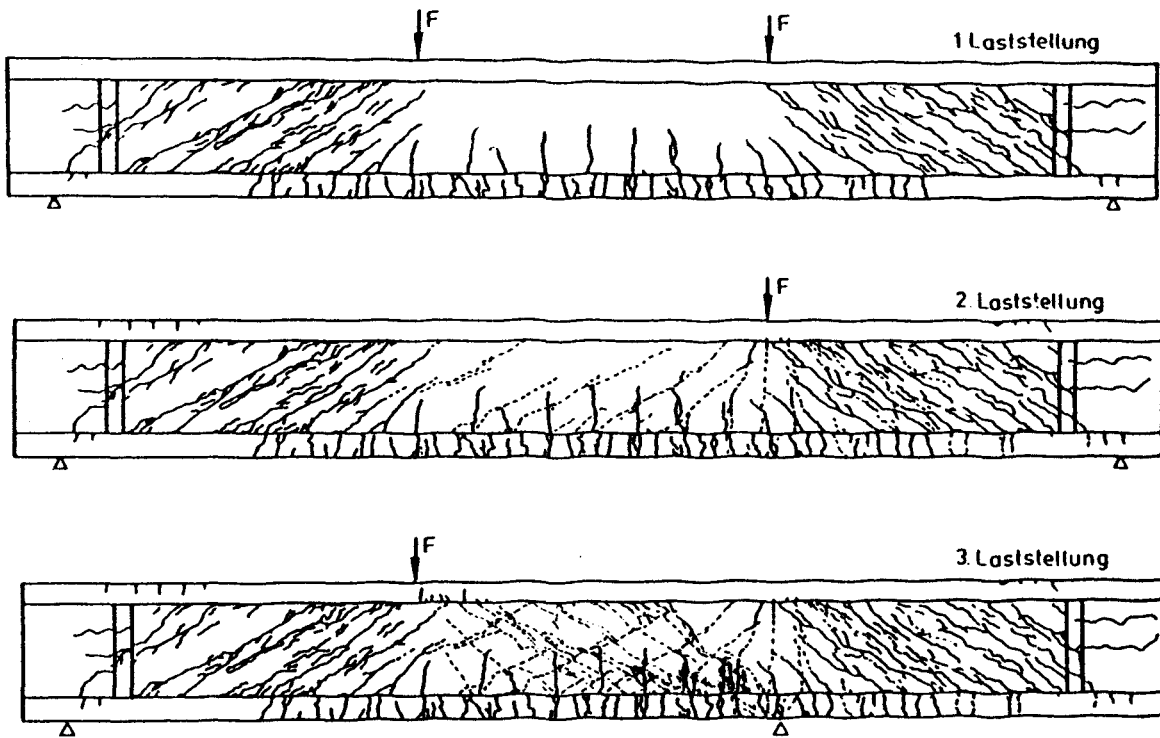
Anlage A5.22: Durchbiegungen des Versuchsbalkens SB 5,
2. Laststellung

Durchbiegung in mm/m $F_{\max} = 990.0 \text{ kN}$

Meßstelle	Belastungsgrad F/F_{\max}														
	0.000	0.101	0.202	0.303	0.404	0.505	0.606	0.657	0.707	0.758	0.808	0.859	0.909	0.960	1.000
1	0.000	0.810	1.410	1.965	2.555	3.225	3.810	4.140	4.510	4.940	5.360	5.845	6.465	7.045	7.650
2	0.000	0.990	1.910	2.850	3.865	5.065	6.145	6.745	7.435	8.255	9.055	9.995	11.195	12.305	13.405
3	0.000	0.960	1.890	2.910	4.050	5.480	6.695	7.385	8.215	9.225	10.220	11.395	12.990	14.425	15.835
4	0.000	0.745	1.485	2.375	3.320	4.560	5.520	6.050	6.715	7.570	8.415	9.390	10.695	11.820	13.090
5	0.000	0.395	0.765	1.340	1.840	2.195	2.545	2.725	2.905	3.070	3.210	3.375	3.630	4.050	4.405



Anlage A5.23: Durchbiegungen des Versuchsbalkens SB 5, 3. Laststellung



DOBER : 423

Anlage A5.24: Ribbild Balken SB 5

30-0137/001

1. Mai 1986